



Recherche d'une méthode optimale de prévision de pluie par radar en hydrologie urbaine

Thomas Einfalt

► To cite this version:

Thomas Einfalt. Recherche d'une méthode optimale de prévision de pluie par radar en hydrologie urbaine. Sciences de la Terre. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1988. Français. NNT : . tel-00520784

HAL Id: tel-00520784

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00520784>

Submitted on 24 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

78016

NS 14887

X (2)

Don

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

THESE DE DOCTORAT

présentée à

L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité

SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT

par

Thomas EINFALT

Sujet de la thèse :

**RECHERCHE D'UNE METHODE
OPTIMALE DE PREVISION
DE PLUIE PAR RADAR
EN HYDROLOGIE URBAINE**



06

Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur
de l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité :
SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT

Sujet :

*RECHERCHE D'UNE METHODE OPTIMALE DE PREVISION
DE PLUIE PAR RADAR EN HYDROLOGIE URBAINE*

par
Thomas EINFALT



Soutenue le 2 Mai 1988
devant le Jury composé de :

M. Joseph JACQUET (Président)
M. Hubert EMPTOZ (Rapporteur)
M. Wolfgang SCHILLING
M. VIDAL-COHEN
M. Guy JACQUET (Directeur de Recherche)

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur soutien tout au long du séjour de deux années passées au sein du CERGRENE, que ce soit sur le plan strictement professionnel ou sur un plan plus personnel.

Je mentionnerai, en particulier, M. Guy JACQUET, mon directeur de thèse, sans lequel ce travail aurait été impossible. C'est lui, en effet, qui m'a proposé il y a trois ans de venir au CERGRENE et m'a permis ainsi de vivre une expérience intense et précieuse. Je le remercie entre autre pour les discussions fructueuses et souvent très passionnées et l'attention amicale qu'il m'a montrée ; laquelle m'a permis d'aborder dans les meilleures conditions la vie et les cultures en France.

Dès 1980, M. Wolfgang SCHILLING, professeur en hydrologie à l'Université de Hanovre en R.F.A., m'a transmis les concepts fondamentaux valables en hydrologie, et il était le premier à me proposer de débiter un travail sur le traitement de données radar appliqué à l'hydrologie. Grâce à lui et son enthousiasme, j'ai appris à être ouvert à toute nouvelle idée.

Il y a cinq ans, les travaux de MM. Geoff L. AUSTIN et Aldo BELLON de l'observatoire radar à l'Université McGill à Montréal (Canada), des années 70, ont constitué ma première source d'information sur la prévision par radar. J'ai pu, par la suite, au cours d'un voyage en Amérique du Nord en Octobre 1986, les rencontrer et apprécier leur profonde connaissance du sujet. Pour cette raison, je suis très heureux et honoré qu'ils aient bien voulu revoir mon rapport de thèse.

C'est au cours d'une discussion avec M. le Professeur VIDAL-COHEN, Professeur en Mathématique à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, qu'est apparu le concept mathématique de "l'agrégation hiérarchique". Comme tout concept complexe, il nous a fallu l'examiner sous différents aspects et préciser son intérêt en vue d'une adaptation définitive pour la prévision de pluie.

M. Patrick DAVID, du Centre Météorologique du Bourget, a également participé à cette réflexion et apporté sa vue d'expert météorologue. Il a, en outre, toujours suivi le déroulement de la thèse attentivement et avec intérêt.

D'autres perspectives théoriques m'ont été ouvertes par M. Hubert EMPTOZ, de l'INSA de Lyon et l'autre rapporteur de ma thèse ; sa thèse de doctorat d'Etat constitue une mine d'information, très riche et facilement transposable à notre sujet.

Mme Catherine GRANGER de l'INRIA de Rocquencourt (Yvelines), m'a aussi permis de clarifier plusieurs points liés à la reconnaissance des formes. Ses travaux sur les galaxies m'ont beaucoup inspiré.

Mon "jumeau" Thierry DENOEU du CERGRENE, thésard en évaluation des performances de prévisions radar, mérite ma reconnaissance à beaucoup de titres : il m'a accompagné, "supporté" et soutenu pendant ces deux années.

L'écriture de la partie relative au processeur vectoriel a gagné en clarté grâce aux conseils de M. Neumane CHAREF du CERGRENE qui m'a, de plus, apporté son soutien inattendu dans la phase finale de ma thèse.

Finalement, c'est toute l'équipe du CERGRENE (y compris les secrétaires !) que je remercie pour son soutien actif et continu.

Egalement, je remercie chaleureusement l'équipe de la DDE Seine-Saint-Denis avec laquelle ce fut un véritable plaisir de travailler ; en particulier MM. Jean-Marie DELATTRE, Hervé BRUNELLOT et Guy AURIAUX étaient toujours ouverts à toutes mes questions.

Je voudrais enfin exprimer ma reconnaissance à M. le Professeur Joseph JACQUET, Professeur en hydrologie à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse. J'ai pu à plusieurs reprises apprécier son intérêt pour les aspects opérationnels (marge d'erreurs, ...).

RESUME

Cette thèse a pour objet le premier développement d'une méthode de prévision de pluie par radar adaptée aux objectifs de l'hydrologie urbaine.

Après la présentation des travaux effectués sur la prévision de pluie dans les 20 années dernières, notamment au Canada, aux Etats-Unis, en Angleterre et en France, les quatre étapes traditionnelles d'une méthode fondée sur la reconnaissance des formes sont analysées :

- la définition des échos
- la caractérisation des échos
- le couplage et
- la prévision.

Pour chaque étape, les algorithmes prometteurs utilisés dans les études précédentes ont été sélectionnés en vue des objectifs de l'application envisagée :

- concentration sur les fortes pluies (> 5 mm/h),
- temps de calcul inférieur à 60 secondes et
- contrôle de qualité de la prévision.

L'étape de définition des échos consiste en la détermination du seuil "intéressant" d'intensité de pluie pour une image donnée et en regroupant les points dépassant ce seuil en ensembles selon un algorithme d'agrégation. Il est évident que chaque algorithme d'agrégation a des avantages et des inconvénients, qui sont discutés.

La caractérisation des ensembles ainsi définis, les "échos", est un rattachement d'information à chaque écho : elle consiste à identifier les caractéristiques les plus significatives pour une reconnaissance ultérieure comme l'emplacement, l'élongation, la taille,...

Pour tenir compte des évolutions d'échos possibles (séparation, fusion,...), une étape supplémentaire est créée : la définition d'échos "imaginaires", l'examen des échos définis dans la première étape, permet la recherche des plus proches d'entre eux qui pourraient fusionner éventuellement sur l'image suivante. Pour être capable de les reconnaître dans ce cas-là, on les fusionne et on ajoute l'écho artificiel résultant aux échos déjà trouvés. Ce processus de création d'échos imaginaires s'apparente aux méthodes de classification automatique.

Dans l'étape suivante, le couplage, on tente de reconnaître les échos d'une image sur une image ultérieure en n'employant que les caractéristiques de forme des échos et des caractéristiques propres à la situation météorologique. Une procédure de contrôle heuristique vérifie la concordance des couples d'échos reconnus.

Cette reconnaissance des échos permet ensuite un pronostic sur le comportement futur de chaque écho, notamment sa tendance de déplacement et sa tendance de croissance et d'intensification. Habituellement, on se borne dans l'étape de prévision à la seule tendance de déplacement, mais l'importance hydrologique de la croissance et l'intensification demande également une analyse plus approfondie du deuxième phénomène. N'étant pas un processus linéaire, sa modélisation pose cependant actuellement encore des problèmes.

Une discussion de tous les facteurs météorologiques de dégradation d'une prévision, a ensuite été nécessaire. Pour chacun d'eux, l'analyse s'est concentrée sur son importance hydrologique et sur les possibilités de réduire son influence. Il en est sorti une méthode de prévision de pluie, testée sur un échantillon de 94 images, groupées en sept événements de caractère très différent.

Les performances de cette méthode ont été comparées avec celles de cinq autres plus triviales ou plus classiques : pour cette comparaison, aux critères de performances traditionnels de la météorologie, se sont rajoutés des critères proches des objectifs hydrologiques ; six critères de performance ont donc été retenus.

En résumé, cette comparaison montre :

- que la méthode développée dénommée SCOUT II.0, donne les meilleurs résultats, sans toutefois apporter sur les événements étudiés d'amélioration significative par rapport à la méthode classique de corrélation croisée ;
- que la qualité de prévision par SCOUT II.0 paraît assez bonne pour qu'on procède à une application opérationnelle ;
- que la même méthode avec une modélisation simple de la croissance et de la diminution d'échos ne donne pas encore de résultats satisfaisants ;
- qu'il est possible de prévoir que la prévision sera fiable si le nombre d'échos moyen et la différence du nombre d'échos entre les deux images utilisées pour la prévision sont faibles ;
- que la méthode SCOUT II.0 peut encore être améliorée dans l'étape de couplage : une analyse de 860 couplages a montré que l'utilisation des caractéristiques de forme des échos n'est pas encore optimale ;
- que les axes de recherche futurs vont être liés à une meilleure formalisation de l'étape de couplage, à l'élargissement du nombre d'échos couplés et au problème de croissance et diminution d'écho.

L'implantation et l'utilisation de cette méthode pour le service opérationnel à la DDE Seine-Saint-Denis a demandé un complément d'études. Les tâches principales sont d'alerter l'équipe en astreinte et de planifier l'heure d'intervention pour des travaux courts en présence d'un risque de pluie.

SHORT SUMMARY

This thesis is the first study to include hydrological reasoning already at the development step of a radar rainfall forecasting method. In this, we intend to be closer to the objectives of the final application in urban hydrology.

First, the major rainfall forecasting projects of the last 20 years are reviewed, studies from Canada, the USA, the United Kingdom, from France and others. The four steps repeated in every pattern recognition method are then presented :

- echo definition
- echo characterisation
- matching
- forecasting.

As each of these steps can be treated in several ways, the ideas of the previous studies as well as new techniques have been analysed. A special focus has been put on.

- heavy rainfall regions (> 5 mm/h)
- fast calculation time on the given computers (inferior to 60 sec) and
- quality control of the forecast in real time.

The echo definition step consists of determining the "interesting" intensity level for a given image and clustering the pixels found by this procedure into groups. There are several reasonable clustering algorithms of which the pros and cons are described.

The resulting groups, the "echoes", are characterised by simple form features. The intention is to describe each echo as complete as possible not surpassing a certain degree of complexity, using in our case the size and locality of an echo and other features as elongation for further use in the following forecasting steps.

An additional step in order to allow for echo splitting and merging has been created : the definition of "artificial echoes". The echoes found in the first (clustering) step are analysed to find those who might merge within the next time step and so appear as one on the following radar image. To take into account this case, two echoes liable to merging are artificially regarded as one echo and also given to the matching process. The procedure to identify these echoes is an automatic classification procedure.

In the next step, the matching phase, echoes of one image are tried to be recognized in the following image, using only their form features and meteorological informations. A heuristic control procedure has been added to guarantee for an optimal choice of matches.

The set of matched echoes now allows to analyse displacement actions globally and individually as well as growing and shrinking tendencies of echoes. These tendencies can be extrapolated to get a forecasted image of a future instant. Usually, only displacement tendencies are used for that although the known impact of growing and shrinking demands further investigations. Not being a linear process, its modelisation is more complicated and has not yet given satisfactory results.

Approaching the problem from a more meteorological point of view, a discussion of all important factors that could influence the forecasting process or its interpretation was necessary. For each of these factors, ways of avoiding its influence and a proper hydrological classification of its importance was made.

All these analyses led to a forecasting method that has been tested on 94 images of seven very different events. The chosen forecasting method scout II.0 was tested together with five other methods.

The traditional performance criteria, based on meteorological reasoning, do not always give results with a hydrological sense. So all along these tests, six different criteria have been used and analysed.

The summary of the test results states :

- that the chosen scout II.0 method is the best together with the classical crosscorrelation method ;
- that the forecasting results of scout II.0 encourage its operational testing ;
- that a preliminary method also including a growth and decay forecast does not yet give satisfactory results ;
- that it is possible to determine the reliability of a forecast by two imagery features before even issuing the forecast ;
- that the matching step of scout II.0 can still be improved by a more optimal control procedure ;
- that the future efforts on improving this method will be a better formalisation of the matching step, leading to a larger number of echoes recognized, and a closer look on to growth and decay of echoes.

For implementation and operational use of the scout II.0 method on the Seine-Saint-Denis system, further investigations were necessary :

- on the available computers at the DDE Seine-Saint-Denis and
- on the practical use of the forecasted informations.

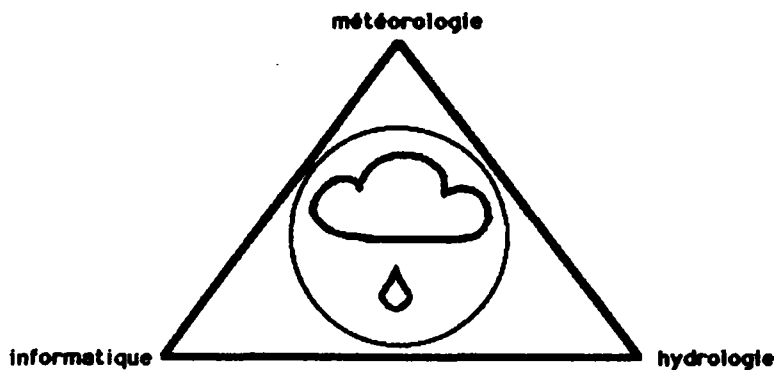
For operational purposes, there were two main points of interest that have been considered : an automatical rainfall warning for the team on call at night or on weekends and a planning guide for short works in the sewer itself. The last point avoids the equipment team a useless ride to the working site.

Of course, the forecasting method will be used by other research works, studying an optimal use of the furnished information, the potential utilisation for the real-time control scheme and all the improvements of the method itself as described above. However, it will be the operational use that determines its value for treating the present problems.

AVANT-PROPOS

Ce travail est un travail pluridisciplinaire qui se situe dans le triangle formé par la météorologie, l'informatique et l'hydrologie. Cet ordre correspond au chemin qui va de la source (des données) à l'utilisation pratique, car les trois domaines se partagent les tâches:

- d'acquisition des données et d'expertise (météorologie)
- de fournisseur d'outils, de formalisation de l'expertise météo (informatique) et
- d'application finale et donc de définition d'objectifs (hydrologie).



Cette liaison est nouvelle puisque les objectifs de la météorologie sont encore peu liés à l'hydrologie, les outils de l'informatique sous forme du traitement d'images, de la reconnaissance des formes et de l'intelligence artificielle ont rarement été utilisés ensemble sur des images qui ne contiennent pas d'objets connus, et dans l'hydrologie quotidienne on utilise toujours davantage la statistique que des méthodes déterministes, même pour des prévisions de pluie ou de crue.

Les études météorologiques sont rarement liées à un aspect hydrologique, et toute méthode de prévision météorologique de pluie a jusqu'à présent servi à d'autres applications d'un caractère plutôt climatologique. D'autre part, il faut comprendre le fonctionnement météorologique de création et non-créeation de pluie pour être capable de modéliser ce phénomène, pour ne pas parler des incertitudes liées à la mesure de pluie par radar qui a été introduite par les météorologues.

Les méthodes informatiques utilisées n'entrent toujours pas dans un cadre théorique qui les relie. De cette façon, il y existe d'un côté les protagonistes du traitement d'images (application de masques, filtrages,...), souvent influencés par l'électronique, et de l'autre côté les travaux sur l'intelligence artificielle (joueur d'échecs, traduction automatique,...), guidés par une application bien cernée. La reconnaissance des formes est beaucoup plus jeune ; elle s'est inspirée surtout de la perception humaine qu'elle essaie de modéliser par des méthodes, toujours imparfaites, empruntées à ces deux prédécesseurs. Même s'il y a des essais de liaison de la reconnaissance des formes à des théories bien fondées comme par exemple la topologie, il est aujourd'hui hors de question de pouvoir construire un appareil qui utilise aussi bien que l'oeil et le cerveau humain la connaissance et des caractéristiques "importantes" de scènes visuelles. Il est cependant possible, comme dans l'intelligence artificielle, de formaliser quelques aspects qui éventuellement peuvent déjà donner un résultat satisfaisant pour quelques applications spécifiques.

L'hydrologie, finalement, est une discipline d'ingénierie qui a besoin de méthodes "sûres". Pour les applications "statiques" comme la conception d'un réseau d'assainissement, il est souvent suffisant de connaître la distribution de récurrence d'événements d'une certaine ampleur: le choix statistique du risque du débordement entraîne le dimensionnement du réseau. Dans les dernières années il y eu une prise de conscience du gain financier et en sécurité du personnel qui pourrait résulter de la gestion du processus dynamique d'écoulement d'eau dans le réseau. En conséquence, il s'est créé pour cette gestion un fort besoin d'outils déterministes, plus détaillés que les outils statistiques d'auparavant.

Comme on le trouve souvent entre différents domaines, il y a des méthodes utilisées dans un domaine qui peuvent se trouver utiles pour un autre où elles ne sont pas encore connues. Pour cette raison, il y avait parfois des problèmes de traduction entre les différents domaines, soit en formalisant une connaissance soit simplement en nomenclature.

Nous allons aborder ce problème de compréhension entre les domaines en raccordant des exemples typiques pour la reconnaissance des formes à des problèmes rencontrés en météorologie radar. Même si ces exemples parfois paraissent évidents ou même triviaux, ils illustrent les réflexions à faire pour relier une application en hydrologie météorologique à la théorie informatique.

C'était exactement cette pluridisciplinarité, qui a rendu ce travail très intéressant. Nous espérons qu'existera dans les pages qui suivent la clarté indispensable d'un tel travail de "médiateur" entre les domaines cités...

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

P. 6

PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART DES METHODES AUTOMATIQUES DE PREVISION RADAR

2. BASES HISTORIQUES

P. 13

2.1. LES SYSTEMES DE PREVISION OPERATIONNELS

P. 14

2.1.1. Le groupe de l'Université McGill à Montréal/Canada

P. 14

2.1.1. Le Illinois State Water Survey (ISWS) à Champaign, Etats-Unis

P. 15

2.1.3. Les activités du Meteorological Office en Angleterre

P. 16

2.1.4. Le National Severe Storms Laboratory (NSSL) à Norman, Etats-Unis

P. 17

2.1.5. La Météorologie Nationale en France

P. 18

2.2. LES METHODES DE PREVISION

P. 19

2.2.1. Traitement de l'image entière : la corrélation croisée

P. 20

2.2.2. La méthode de reconnaissance des formes

P. 22

2.2.3. Comparaisons antérieures des approches

P. 29

DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION ET CONSTRUCTION D'UNE NOUVELLE METHODE AUTOMATIQUE DE PREVISION RADAR

| | |
|---|-------|
| 3. OUTILS METHODOLOGIQUES | P. 35 |
| 3.1. "CLUSTERING" OU LA DEFINITION DES ECHOS (1ère étape) | P. 37 |
| 3.2. CARACTERISATION DES ECHOS (2ème étape) | P. 40 |
| 3.3. L'INTRODUCTION D'ECHOS "IMAGINAIRES" | P. 44 |
| 3.3.1. Approche intuitive d'agrégation d'échos | P. 45 |
| 3.3.2. Choix d'un écart entre échos | P. 46 |
| 3.3.3. Choix d'une méthode d'agrégation d'échos | P. 49 |
| 3.3.3.1. Méthodes classiques de classification automatique | P. 50 |
| 3.3.3.1.1. L'algorithme des k-plus proches voisins | P. 50 |
| 3.3.3.1.2. L'algorithme des ϵ -voisins | P. 53 |
| 3.3.3.1.3. L'algorithme des nuées dynamiques | P. 55 |
| 3.3.3.2. Le cadre théorique de notre approche intuitive | P. 57 |
| 3.3.3.3. Propriétés mathématiques liées à cette méthode | P. 60 |

| | |
|---|-------|
| 3.4. LE COUPLAGE HIERARCHIQUE (3ème étape) | P. 62 |
| 3.4.1. Classification et couplage | P. 62 |
| 3.4.2. Vers une technique de couplage hiérarchique | P. 64 |
| 3.4.3. Mécanismes de contrôle | P. 66 |
| 3.4.3.1. Exclusion de couples stupides | P. 67 |
| 3.4.3.2. Paramètres invariants | P. 69 |
| 3.4.3.3. Une approche itérative du contrôle | P. 69 |
| 3.4.3.4. Caractérisation de l'évènement | P. 71 |
| 3.5. PREVISION ET EXTRAPOLATION (4ème étape) | P. 72 |
| 3.5.1. Le calcul du mouvement - le cas de la translation simple | P. 73 |
| 3.5.2. Une approche linéaire du développement d'échos | P. 75 |
| 3.6. CONCLUSION | P. 78 |
| 4. FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA METHODE DE PREVISION | P. 79 |
| 4.1. FACTEURS METEOROLOGIQUES A L'ECHELLE DU RADAR | P. 80 |
| 4.1.1. Quelques rappels météorologiques | P. 80 |
| 4.1.1.1. Le phénomène de l'advection | P. 82 |
| 4.1.1.2. Caractérisation de la convection | P. 83 |
| 4.1.1.3. L'importance des structures convectives | P. 84 |
| 4.1.2. La prise en compte de la croissance et la diminution d'échos | P. 87 |
| 4.1.3. Mouvement anisotrope | P. 90 |

| | |
|--|------------------|
| 4.2. FACTEURS LIES A LA TECHNIQUE RADAR | P. 91 |
| 4.2.1. Echos fixes | P. 91 |
| 4.2.2. L'influence de la distance | P. 92 |
| 4.2.3. L'influence du bord de l'image | P. 94 |
| 4.2.4. Agrégation et séparation | P. 97 |
| 4.3. REFLEXION SUR LE TEMPS DE CALCUL | P. 98 |
| 4.3.1. Le calcul de la corrélation croisée normale | P. 99 |
| 4.3.1.1. La corrélation croisée normale rapide | P.100 |
| 4.3.1.2. La corrélation croisée binaire | P.100 |
| 4.3.1.3. L'algorithme de recherche | P.101 |
| 4.3.2. Reconnaissance des formes : organisation et exploitation de l'information | P.103 |
| 4.3.2.1. L'organisation de l'information sur une image | P.103 |
| 4.3.2.2. La consommation en temps calcul | P.104 |

TROISIEME PARTIE : COMPARAISON ENTRE PLUSIEURS METHODES DE PREVISION SUR UN ECHANTILLON TEST

| | |
|---|-------------------|
| 5. LES METHODES DE PREVISION | P. 110 |
| 5.1. La persistance | P. 111 |
| 5.2. Le vent | P. 112 |
| 5.3. La corrélation croisée binaire | P. 112 |
| 5.4. La version scout II | P. 113 |
| 5.5. La version scout II.0 | P. 119 |
| 5.6. La version scout II.c | P. 121 |
| 6. L'ECHANTILLON TEST | P. 123 |
| 6.1. Origine des données | P. 124 |
| 6.2. Défauts | P. 125 |
| 6.3. Caractéristiques de sept évènements étudiés en détail | P. 126 |
| 7. CRITERES DE PERFORMANCE | P. 135 |
| 7.1. CSI, RI et coefficient de corrélation croisée | P. 136 |
| 7.2. Qu'est-ce qu'une bonne prévision hydrologique ? | P. 138 |
| 7.3. Un critère hydrologique | P. 140 |
| 7.4. Le mouvement prévu | P. 142 |
| 7.5. Le temps de calcul | P. 143 |
| 7.6. Autres critères | P. 143 |

| | |
|--|--------|
| 8. RESULTATS | P. 145 |
| 8.1. Le 21 Juin 1984 | P. 146 |
| 8.2. Le 13 Juillet 1984 | P. 149 |
| 8.3. Le 5 Septembre 1984 | P. 151 |
| 8.4. Le 10 Septembre 1984 | P. 153 |
| 8.5. Le 1 Octobre 1984 | P. 156 |
| 8.6. Le 24 Octobre 1984 | P. 159 |
| 8.7. Le 8 Novembre 1984 | P. 162 |
| 8.8. L'importance relative des critères de reconnaissance | P. 165 |
| 8.9. Caractérisation des prévisions difficiles | P. 166 |
| 8.10 Les résultats sur les 1068 images | P. 167 |
| 8.11 L'événement du 24 août 1987 - on approche les limites actuelles d'une prévision automatique | P. 171 |
| 8.12 Résumé des prévisions test | P. 177 |

APPENDICE : IMPLANTATION DU MODELE SUR LE SYSTEME D'AIDE A LA CONDUITE DU DEPARTEMENT SEINE-SAINT-DENIS

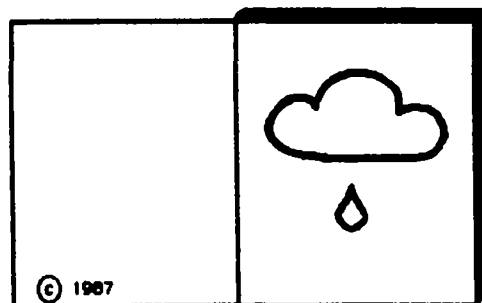
| | |
|--|--------|
| 9. OBJECTIFS POUR LE SERVICE OPERATIONNEL | P. 180 |
| 9.1. BREVE PRESENTATION DU SYSTEME DE GESTION AUTOMATISEE | P. 181 |
| 9.2. LES QUATRE MODES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME | P. 182 |
| 9.2.1. Le suivi courant | P. 182 |
| 9.2.2. Le suivi spécial | P. 183 |
| 9.2.3. Le suivi exceptionnel | P. 183 |
| 9.2.4. Le simulateur | P. 183 |
| 9.3. LES OBJECTIFS POUR L'INTRODUCTION DE LA PREVISION | P. 184 |
| 9.3.1. L'utilisation pour les astreintes | P. 184 |
| 9.3.2. L'utilisation pour le simulateur | P. 185 |
| CONCLUSION | P. 189 |
| Bibliographie | P. 190 |

ANNEXES

1. Organisation de stockage des données
2. Tableaux des résultats
3. Utilisation des données (lecture et entrées)
4. La ligne de grains du 7 Juin 1987
5. Description mathématique d'objets
6. CAPPI et bande brillante.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION ET OBJECTIFS



L'hydrologie - science de l'eau - concerne aussi bien l'eau de surface que les eaux souterraines. Cependant, la source d'eau la plus importante étant la pluie, on s'est intéressé depuis longtemps à sa mesure. Traditionnellement, on utilise des pluviographes, mais ils ont un désavantage important : ils mesurent la pluie ponctuellement dans l'espace. Ce qui intéresse l'hydrologie, ce sont plutôt des mesures sur une surface et depuis le début de l'utilisation des pluviographes, on a essayé de calculer à partir de ces mesures ponctuelles la pluie sur une surface (Thiessen, 1911).

Au cours de la deuxième guerre mondiale, on s'est aperçu des perturbations dues à la pluie sur les détecteurs radar des avions adverses. Par la suite ce phénomène a été analysé par des météorologues pour obtenir un outil pour la mesure de la pluie. L'intérêt de cette mesure est qu'elle fournit une information sur une grande surface. C'est pourquoi l'hydrologie s'est intéressée, depuis les années soixante, à l'analyse de l'utilisation du radar pour réaliser des mesures quantitatives.

A la suite des résultats encourageants dans le projet sur la rivière Dee en Pays de Galles à cette époque, les hydrologues urbains s'y sont intéressés en s'efforçant d'améliorer la résolution spatiale des mesures et de gagner du temps pour l'alerte des crues en étudiant les méthodes de prévision.

Dans les cinq dernières années, ceci a contribué à promouvoir quelques schémas de gestion des réseaux d'assainissement dont le projet du département de Seine-Saint-Denis est actuellement un des plus avancés, grâce à une collaboration étroite entre météorologues, hydrologues et utilisateurs.

Les quatre objectifs principaux d'une telle gestion sont :

- protéger la qualité des eaux réceptrices (prévention de pollution),
- le contrôle de la quantité d'eau dans le réseau (prévention des inondations),
- réguler la charge à l'entrée des stations d'épuration,
- assurer la sécurité des équipes travaillant dans les égouts.

Pour la gestion, on utilise comme moyens principaux la dérivation ou la rétention des eaux grâce à des vannes et à des pompes. Par exemple par la commande de certaines vannes on peut diriger les eaux du réseau d'assainissement soit vers la station d'épuration soit dans le milieu récepteur.

Pour tout ce qui concerne les actions sur le réseau en temps réel (donc au delà d'une simple observation), l'hydrologue a besoin de prévisions des états futurs de son réseau, de la connaissance de l'état actuel et des facteurs influents les plus importants. L'un d'entre eux, est la pluie, et un grand nombre de chercheurs ont évoqué la nécessité d'avoir une prévision de pluie correcte pour les besoins de l'hydrologie (Damant et al., 1983; Schilling, 1984; Andrieu et al., 1985).

Parce que l'information des pluviomètres est une information ponctuelle, ni nécessairement représentative sur un bassin versant ni toujours suffisamment exacte (Neff, 1975), le radar apparaît apte à donner des informations plus détaillées sur une grande surface. Le radar est généralement utilisé pour la mesure de pluie de la manière suivante (fig. 1.1):

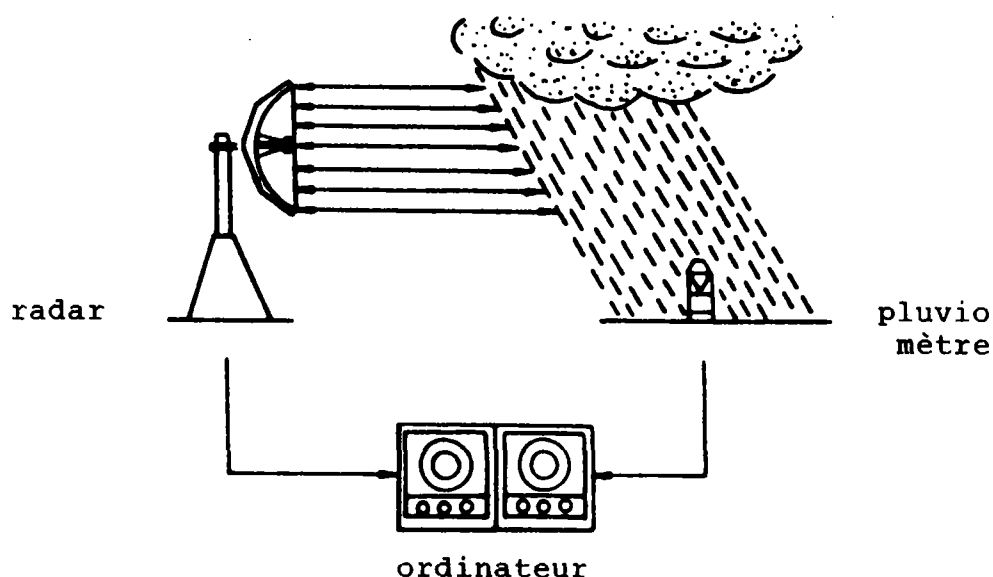


Figure 1.1: L'organisation des mesures par radar

- il illumine un cône de faible angle d'ouverture par un faisceau électromagnétique,
- les gouttes d'eau présentes dans ce cône réfléchissent partiellement le faisceau,
- le radar mesure la puissance réfléchie sur des secteurs de ce cône, appelées portes,
- ces valeurs par portes sont agrégées sur des volumes de plus grande taille correspondant à des projections au sol soit en secteurs, soit en rectangles (les "pixels")
- des mesures par pluviographes sont faites au même temps,
- un ordinateur calcule la relation entre la pluie tombée et la réflectivité mesurée, un procédé appelé "calibration".

Une description plus complète a été faite par Andrieu (1986), et des informations plus détaillées sur les erreurs se trouvent dans Zawadski (1984).

La calibration, l'étape la plus importante tente de trouver le rapport le plus réaliste, variable dans le temps et l'espace, entre l'apport en eau résultant de la mesure par le radar, et celui résultant par des pluviographes. La relation pluie-réflectivité :

- dépend de la marge d'erreurs des pluviographes,
- dépend de la topographie (montagne,...),
- est sensible au changement de la distribution des gouttes d'eau en temps et,
- varie avec la distance entre les pluviomètres et les endroits à calibrer.

Plusieurs outils contre ces causes d'erreur ont donc été développés, entre autre la calibration par krigeage pour traiter les problèmes spatiaux (Andrieu, 1986), l'utilisation des disdromètres (compteur de gouttes) à la place des pluviomètres (Breuer, 1976), diverses règles de correction prenant en compte l'influence du relief (Collier et al., 1983; Collier, 1986a),...

Même s'il reste encore des problèmes de "traduction" en valeurs hydrologiques à résoudre, l'avantage du radar, c'est la bonne représentation de la structure spatiale de la pluie, qui est très prometteuse pour les hydrologues.

Cette recherche suppose que les estimations obtenues sont ou seront suffisamment bonnes pour une utilisation hydrologique.

Le but de ce travail de recherche est la mise au point d'une méthode de prévision de pluie pour les besoins de la gestion automatisée des réseaux d'assainissement pluviaux.

Il n'est pas dans nos intentions de démontrer que cette méthode est applicable à tous les problèmes de prévision de pluie: alerte pour le déneigement des routes, alerte de crues sur des bassins non-urbanisés,... La connaissance approfondie de notre champ d'application conduit à privilégier une méthode, et notre objectif n'est pas de démontrer que c'est la meilleure dans tous les cas de figure.

Le champ d'application privilégié en est le réseau d'assainissement du département Seine-St-Denis. Ce département est très urbanisé avec une pente très faible des canaux et des rivières. C'est pourquoi l'écoulement des eaux dans son réseau d'assainissement est relativement lent, ce qui entraîne un danger d'inondations en présence de fortes pluies.

Dans le département, la zone à gérer est constituée par cinq bassins versants d'une taille comprise entre 10 km² et 200 km² (figure 1.2), avec un temps de réponse entre 30 et 60 minutes (entre l'arrivée de la pluie sur le sol et dans le réseau). Si l'on disposait d'une prévision locale (à 5 km près) sur une échéance d'une demie à une heure, on doublerait le temps d'action ou d'alerte.

Les images radar disponibles utilisées dans cette étude ont un format de 256 sur 256 pixels, de 1.6 x 1.6 km chacun. Le rythme de réception des images est de 15 minutes.

En courant de l'année 1988, le format d'un pixel et l'intervalle de réception changeront: on disposera des pixels d'une taille de 800 x 800 m et des images arrivant toutes les 72 secondes. Pendant cette période de 72 s, il faut faire l'acquisition et la correction des images ainsi que la prévision.

Une limite stricte de temps calcul est alors indispensable. Egalement d'un point de vue utilisateur, parce que sur l'ordinateur SPS9 du département Seine-Saint-Denis (qui ne peut pas être facilement échangé) il y a le logiciel d'aide à la gestion automatisée qui tourne au même temps. Pour ne pas dégrader la performance de ce logiciel, il est absolument nécessaire que le temps calcul pour tout le traitement d'images soit le plus bas possible.

Les exigences du point de vue de l'utilisateur sont:

- rapidité sur l'ordinateur (une minute de calcul sur miniordinateur SPS 9),
- validité pour les grandes échéances d'une demi heure à une heure environ,
- fiabilité avec une estimation des marges d'erreurs pour chaque bassin versant local (estimation de risques en termes hydrologiques) et
- non-intervention d'un météorologue professionnel et réduction du temps consacré à la prévision météorologique pour mieux se concentrer sur la gestion hydrologique.

Ces exigences conduisent à une automatisation du processus de prévision.



Figure 1.2: Le département de Seine-Saint-Denis

Nous avons divisé ce rapport de thèse en trois parties principales. La première est consacrée à la présentation de l'état de l'art des méthodes automatiques de prévision radar. Elle permet de montrer l'originalité de cette thèse par rapport aux méthodes opérationnelles utilisées et par rapport aux recherches antérieures.

La seconde est une présentation de la double démarche de conception et de construction de notre méthode automatique de prévision radar:

- des outils courants à traiter les images radar et
- des problèmes à résoudre par une méthode de prévision.

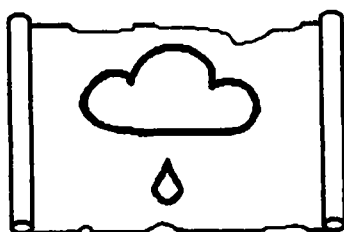
La troisième partie va présenter de manière détaillée trois versions de notre méthode automatique de prévision et va permettre de comparer ses performances avec des méthodes classiques existantes.

Les détails de l'installation opérationnelle de la méthode finale seront brièvement décrits dans un appendice destiné à montrer les contraintes insérant la méthode de prévision dans le contexte du système central de gestion automatisée du département de Seine-Saint-Denis.

**PREMIERE PARTIE: ETAT DE L'ART DES METHODES AUTOMATIQUES DE
PREVISION RADAR**

CHAPITRE 2

BASES HISTORIQUES



La prévision de la pluie par radar a déjà été étudiée par plusieurs chercheurs, qui ont - pour la plupart - travaillé avec des objectifs différents des nôtres. En outre le développement des moyens de mesure et de calcul est tellement rapide qu'aujourd'hui on peut utiliser des outils beaucoup plus sophistiqués qu'il y a dix ans. C'est notamment la puissance des ordinateurs, qui est plus grande, et la transmission des données, qui se fait en temps réel et en coordonnées cartésiennes (Wilson, 1966 et Dumoulin, 1963 avaient encore travaillé sur des photographies noir et blanc de l'écran du radar).

2.1. Les systèmes de prévision opérationnels

Selon l'objectif de l'équipe travaillant avec le radar, on a conçu des modèles de prévision bien adaptés. Pour l'instant, il y a cinq équipes ayant des expériences de plusieurs années ou planifiant un très gros projet (NEXRAD).

2.1.1. Le groupe de l'université McGill à Montréal/Canada

Il y a 15 ans, un groupe de recherche s'est formé autour de G.L. Austin et A. Bellon dans le but de trouver une procédure qui permette de calculer en temps réel la vitesse moyenne de champs pluvieux. Cette procédure était une procédure style "corrélation croisée" (cf. 2.2.) dont le groupe a successivement étudié les possibilités d'améliorer les capacités (Tsonis/Austin, 1981 ; Bellon/Austin, 1985 ; Austin, 1985).

Travaillant sur un radar de 10 cm de longueur d'onde, le but est de fournir des mesures et des prévisions de pluie pour des utilisations à des échéances en temps et en espace plus grandes que dans notre cas. Dans cette optique, ils ont défini les caractéristiques suivantes pour leur système :

- mesures toutes les 10 minutes,
- prévision toutes les 30 minutes pour 30, 60 et 120 minutes d'échéance (valeur probable et ses écarts),
- CAPPI (voir l'annexe 6) sur 3 km d'altitude,
- chaque pixel représente un carré de 1 x 1 km. Une image se constitue de 240 sur 240 pixels.

Malgré plusieurs études liées à l'hydrologie urbaine (Bellon/Austin, 1984; Damant et al., 1983a), le groupe de Mc Gill a récemment peu travaillé dans cette optique car les responsables de l'assainissement paraissent moins motivés que d'autres utilisateurs du radar.

Hormis des études sur l'influence de la précision des mesures de pluie sur le calcul des débits (Foroud et al. 1984; Damant et al., 1983b), le groupe se penche plutôt sur l'exportation de sa connaissance sous forme de supports pour les utilisateurs ou même de vente et construction de systèmes de mesure complets.

2.1.2. L' Illinois State Water Survey (ISWS) à Champaign, Etats-Unis

L'ISWS est propriétaire d'un radar transportable de 10 cm de longueur d'onde qui a servi à plusieurs reprises à des campagnes de mesures et de prévision. Parce que cet organisme appartient à l'état d'Illinois, ce sont surtout les problèmes locaux comme ceux de la ville de Chicago ou de la région autour de Champaign qui ont été étudiés, mais aussi une étude sur les effets urbains de la pluie a été également menée, sur la ville de St Louis.

Tandis que l'expérience urbaine à St Louis de 1971 à 1975 avait plutôt un caractère climatologique (Huff, 1976), le projet suivant sur Chicago utilisait en plus une prévision de pluie. Ce système a été développé à partir d'un outil de surveillance de Wiggert et al. (1975) qu'on avait modifié pour une utilisation semi-automatique. Ceci était rendu nécessaire par les contraintes temporelles de l'ordinateur.

La prévision était basée sur une image de 64 x 64 pixels de 3.2 x 3.2 km chacun, mesurée toutes les 10 minutes. Comme à McGill, la prévision a été fournie toutes les 30 minutes pour des échéances de 30, 60 et 120 minutes.

Ce système était développé pour aider la ville de Chicago qui en présence de pluie forte se trouve en danger d'inondation. Malgré des résultats encourageants, un suivi et une application de cette méthode n'ont pas été envisagés par cette ville.

En conséquence, l'ISWS se concentre plutôt sur des campagnes de mesures et sur la recherche de développement du radar (double polarisation, Doppler, vitesse de traitement, etc.).

2.1.3. Les activités du Meteorological Office en Angleterre

Le Meteorological Office en Angleterre est l'équivalent de la Météorologie Nationale en France. Le début de ces activités de recherche sur le radar date de la deuxième guerre mondiale (Collinge, 1985). Mais des projets liés à l'hydrologie n'apparaissent que dans les années 60 où le projet sur le Dee River en Pays de Galles servait de projet pilote tant pour la prévision des crues que pour la régulation de réservoirs.

Ce projet terminé en 1975 a démontré l'intérêt d'un réseau de radars C-Band (5 cm de longueur d'onde) pour la couverture totale de la Grande Bretagne ainsi que d'un projet de support software avec une procédure de prévision de pluie.

Plusieurs études très détaillées ont fait le point sur l'état de l'art des techniques utilisées ailleurs (Harrold, 1976 ; Collier, 1978) et l'apport d'une prévision en termes financiers (Collier, 1977). A l'aide de plusieurs études supplémentaires (Browning, 1981 ; Carpenter/Owens, 1981) on a conçu le système FRONTIERS (Browning, 1979), un produit commun de mesures satellite et radar en utilisation semi-automatique.

La base de la partie radar de cette prévision est une procédure travaillant sur une image de 32 x 32 pixels de 20 sur 20 km chacun. Les prévisions sont calculées pour des échéances jusqu'à 6 heures d'avance.

Ce système est en service permanent, soutenu par le fait que tout le réseau des radars fonctionne automatiquement. Les mesures sont faites avec un pas de temps de 15 minutes et une taille de pixels de 5 x 5 km. Le système conversationnel permet d'écraser des échos parasites ou d'effectuer des corrections pour le gonflage et le dégonflage des échos (Sargent, 1986). En outre, des travaux sur la calibration (Collier, 1986a) et sur la bande brillante (voir annexe 6 et Smith, 1986), ont été inclus dans le système.

2.1.4. Le National Severe Storms Laboratory (NSSL) à Norman, Etats-Unis

Le NSSL développe des outils du radar météorologique:

- pour la détection des orages exceptionnels (tornades, supercellules), il a développé le radar Doppler et montré son intérêt
- pour l'utilisation générale du réseau NEXRAD, il a développé un système matériel et logiciel sur le site du radar et sur des postes périphériques.

La détection des événements exceptionnels se fait normalement en collaboration avec des villes qui en souffrent comme Tulsa, Lawton et Bortlesville par exemple. Pour chacune de ces villes, il y a des contraintes différentes :

- l'utilisation d'un réservoir d'eau potable comme bassin de rétention (Lawton),
- l'alerte de crue pour des habitants de régions en danger (Tulsa),
- l'utilisation d'un bassin de retenue comme lac de récréation (Bortlesville).

Les bassins versants respectifs sont d'une taille allant jusqu'à 4000 km². Pour les mesures, ils disposent actuellement de plusieurs radars 10 cm, qui sont partiellement équipés avec la capacité Doppler (cf. Einfalt et al., 1986). L'écart entre deux images varie entre 20 s (minimum) et 12 minutes.

La base de leurs recherches sur la prévision pour le système NEXRAD est le travail fait par Barclay/Wilk (1970), Wilson/Brandes (1979) et Bjerkaas/Forsyth (1980). Ce système sera disponible à partir d'environ 1993 (Serafin/Carborne, 1984) et va se composer de 165 radars de 10 cm avec la capacité Doppler. La résolution spatiale sera de 1 km sur 1 km jusqu'à une distance de 230 km du radar et de 2 km sur 2 km jusqu'à une distance de 460 km du radar (Ahnert et al., 1984). Le but de cet effort gigantesque est triple :

- l'aide à la gestion du trafic aérien,
- l'aide à la prévision météorologique et,
- l'alerte aux inondations.

En conséquence, 55 produits software sont actuellement en cours de développement. Cela inclut la prévision de crue, la prévision de pluie par corrélation croisée et par une méthode plus sophistiquée (cf. NEXRAD Algorithm Report, 1985). Il faut ajouter que les travaux sur NEXRAD se font en coopération avec plusieurs autres institutions dont les laboratoires de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) à Boulder et à Silver Spring.

2.1.5. La Météorologie Nationale en France

La Météorologie Nationale offre le système METEOTEL qui est un système de visualisation des mesures de radar et de satellite. Celui-ci marche sur un téléviseur normal et permet entre autre :

- l'animation de plusieurs images et
- une détermination du déplacement à la main avec la possibilité d'une extrapolation.

Cette prévision manuelle utilise les contours des échos de l'image précédente qui sont déplacés sur l'image actuelle par l'utilisateur pour attendre la meilleure superposition possible. En supposant la persistance du déplacement observé, les échos présents sont ensuite déplacés et l'heure à laquelle ils commencent à ou finissent d'attendre un point donné de l'image est notée par l'utilisateur. Ce système sert actuellement à la DDE du département de Seine-Saint-Denis pour faire des prévisions en temps réel des crues sur une zone du département, ainsi qu'à d'autres utilisateurs (contrôle de circulation routière, météorologues locaux,...).

A part cela, la Météorologie Nationale a analysé les performances de prévision d'un modèle de corrélation binaire et d'une méthode simplifiée de reconnaissance des formes (Ciccione/Pircher, 1984). Leur conclusion était l'adoption du premier modèle comme modèle "standard". L'objectif de cette étude n'était pas lié à l'hydrologie.

2.2. Les méthodes de prévision

Généralement, on peut distinguer deux catégories d'approches dans les méthodes : celles qui traitent l'image entière et celles qui extraient des informations d'une image pour ensuite travailler sur celles-ci. Ces informations correspondent à des traits caractéristiques de l'image. L'observation de l'image radar a montré l'organisation des pluies sous la forme de conglomerats qui sont appelés "échos" :

Un écho est un ensemble de pixels connexes de l'image.

Cette caractéristique associée à la reconnaissance de l'existence du même écho sur une image précédente permet à un observateur d'identifier une cellule pluvieuse.

Cette notion d'écho nous servira pour décrire aussi les limites des méthodes du traitement de l'image entière que celles des méthodes de reconnaissance des formes.

On ne fait ici aucune différence entre les systèmes automatiques et semi-automatiques car le fonctionnement général est le même. La seule différence est que quelques actions sont assurées par un homme à la place d'un programme, et par conséquent, en mode automatique, le programme doit en plus simuler les actions humaines du mode semi-automatique.

Par la suite, on va faire la différence entre le pas de temps entre deux images et l'échéance entre deux images. Le premier terme va dénoter l'écart entre deux images mesurées, et le deuxième celui entre l'image actuelle à l'instant de la prévision et l'image prévue (fig. 2.1.)

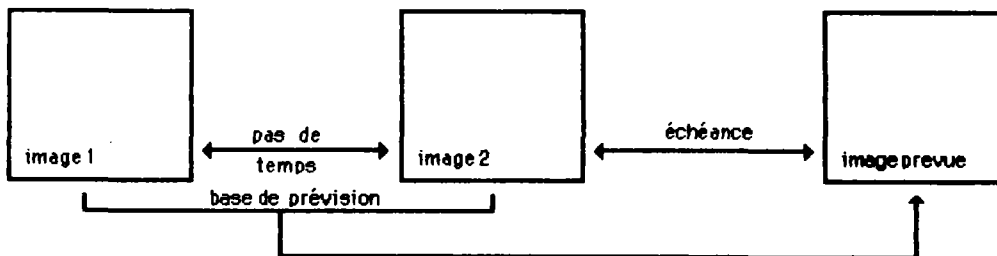


Figure 2.1: pas de temps et échéance entre deux images

De la même manière nous distinguerons entre le vecteur de déplacement, obtenu en analysant le déplacement effectué, et le vecteur de prévision qui est l'extrapolation du mouvement calculé dans le futur avec une considération éventuelle d'autres vecteurs que le vecteur actuel de déplacement.

2.2.1. Traitement de l'image entière : la corrélation croisée (CC)

Comme mentionnée auparavant, c'est l'équipe d'Austin et Bellon qui a profondément analysé les possibilités de cette approche. Leurs rapports (Austin/Bellon, 1974; Bellon/Austin, 1978) indiquaient clairement que cette méthode marche très bien d'un point de vue statistique. Comment fonctionne-t-elle?

En général, la fonction de corrélation croisée mesure la similarité de deux séries de données. Elle calcule pour chaque couple de points, l'un appartenant à l'échantillon 1, l'autre à l'échantillon 2, une valeur de concordance des déviations de ces points des moyennes de leurs propres séries, en tenant compte des écart-types. La valeur résultante décrit alors la concordance des deux séries en fonction du choix des points qu'on a considéré ensemble.

Pour deux images radar M et P de deux instants t et $t + \Delta t$ on l'utilise de la manière suivante:

Les deux images sont superposées et on calcule le coefficient de la corrélation croisée pour une zone commune (fig. 2.2). On compare alors chaque point de M avec le point de P qui se trouve exactement au-dessus. Ensuite, les images sont successivement déplacées l'une sur l'autre pour tous les déplacements possibles. La valeur maximale de ce champ de coefficients résultants indique la meilleure similarité entre les deux images et, sous condition d'une persistance des formes et des intensités sur les images, donne le déplacement le plus probable.

Si l'on suppose que le mouvement des nuages de pluie est plutôt une translation et que les autres effets sont secondaires, cette méthode est tout à fait justifiée.

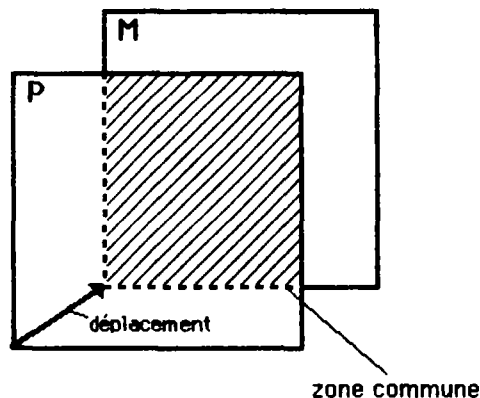


Figure 2.2: Le concept de la corrélation croisée

Austin et Bellon ont travaillé sur leur projet SHARP dans les années 70 avec un pas de temps de 60 minutes entre les mesures radar. Un point mesuré représentait un carré de 5 km sur 5 km et une image contenait 60 x 60 pixels. Leur résultat était, que l'erreur de leur vecteur de prévision était de 18% en moyenne.

Bien sûr, cette méthode, fondée sur un principe assez simple, suppose certaines conditions liées à la situation météorologique et aux objectifs à suivre (p.ex. prévision en temps réel). Son efficacité est limitée

- en cas d'apparition ex nihilis de nouveaux échos,
- si le champ des déplacements est anisotrope sur l'image et
- en cas de changement de forme ou d'intensité dans les cycles de croissance-décroissance d'échos.

A cause de cela, Tsonis/Austin (1981) ont ensuite travaillé sur une méthode de prévision basée sur un modèle "reconnaissance des formes". L'objectif de cette recherche était d'étudier la faisabilité de la modélisation de variations en masse d'eau et en taille des échos. Leur approche résultante d'extrapolation linéaire de ces variations a donné des résultats légèrement supérieures à ceux de SHARP, mais les différences n'ont pas été jugées significatives.

A cause de la mauvaise qualité de la prévision par la méthode de corrélation croisée automatique dans certaines situations difficiles à caractériser globalement, Huff (1981) et Browning (1981) ont étudié l'efficacité de l'intervention d'un opérateur. Ils ont constaté que cette intervention donnait des résultats tout à fait supérieurs à ceux d'un système automatique. Le système FRONTIERS (p.ex. Browning, 1979) qui est opérationnel en Angleterre depuis plusieurs années permet au météorologue de sélectionner lui-même l'élimination de faux échos, la correction d'influence orographique, le choix de zones à traiter de façon homogène par la corrélation croisée,.... Ce système donne la possibilité de choisir plusieurs régions, sur lesquelles on applique la méthode de corrélation croisée séparément: ainsi c'est une approche de l'étude de déplacements individuels des cellules de pluie.

A la NOAA à Boulder, Colorado aux Etats-Unis on trouve un système semi-automatique (PROFS, cf. Mc Coy, 1986), pour prévoir des événements très sévères (plus que 19 mm/h de pluie ou une vitesse de vent plus grande que 90 km/h), tel que orages forts ou tornades. Ce système est appliqué dans les Rocheuses (Colorado).

Notre objectif étant l'établissement d'une méthode automatique, nous ne discuterons pas ici cette approche plus à fond. Toutefois nous nous réservons la possibilité d'une intervention humaine en présence de certains problèmes particuliers rapidement décelables par un opérateur.

2.2.2. La méthode de reconnaissance des formes (RF)

La méthode de reconnaissance des formes est une approche totalement différente liée plutôt à la perception humaine. Une analyse des caractéristiques d'une image est nécessaire, et dans notre cas il nous faut pour cela réaliser une modélisation des processus qui permettent à l'homme de reconnaître des formes dans une suite d'images.

Très généralement un tel modèle se compose de quatre étapes à chaque image (fig. 2.3):

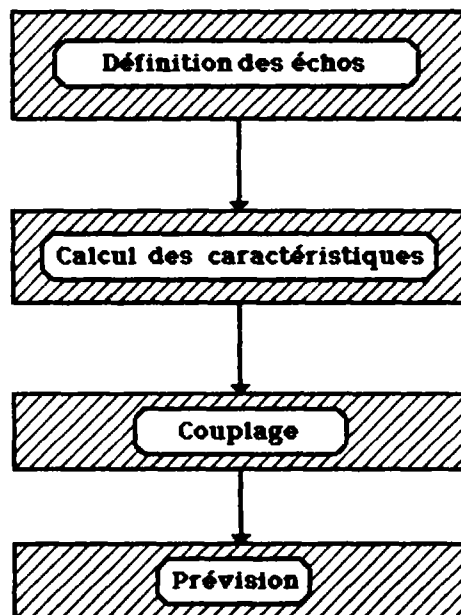


Figure 2.3: Schéma général de l'approche

- (1) l'étape de définition des échos (abstraction par agrégation, "clustering"),
- (2) le calcul des attributs (caractéristiques) de ces entités (les échos), appelée étape de calcul des caractéristiques.
- (3) la "classification" (terme habituel en reconnaissance des formes) des échos ainsi caractérisés correspondant à leur identification à un écho présent sur l'image précédente. Cette étape est appelée couplage.
- (4) l'étape de la prévision : l'extrapolation des caractéristiques de déplacement et éventuellement de déformation dérivées du couplage.

Ce schéma est en fait une synthèse des deux approches classiques de traitement d'images par les systèmes de compréhension citées dans Pratt (1978): de la méthode arborescente ascendante ("bottom-up") et de la méthode arborescente descendante ("top-down").

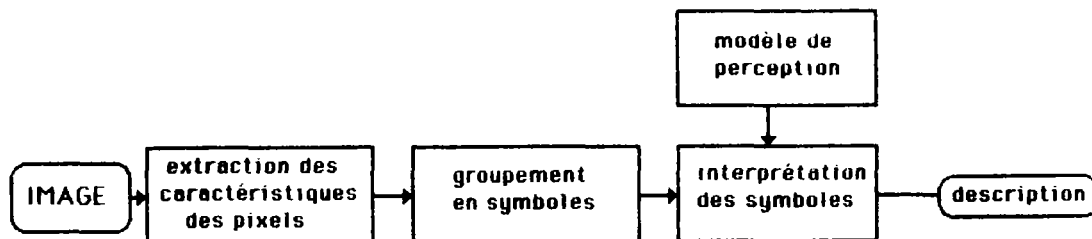


Figure 2.4: La méthode ascendante

On appelle *méthode ascendante* (fig. 2.4) une procédure qui part des données brutes pour extraire des "caractéristiques" qui ensuite sont groupées en "symboles". Comme "caractéristiques" sont désignés les caractéristiques des pixels, et un symbole est un groupe de pixels avec une certaine propriété. Un exemple peut être le dépassement d'un certain seuil des pixels qui ensuite sont regroupées dans des entités connexes comme le sont les échos.

Ces symboles peuvent alors être interprétés à l'aide de modèles de perception pour donner une description de l'image analysée. Un modèle de perception peut par exemple extraire des caractéristiques des symboles pour comprimer encore plus l'information.

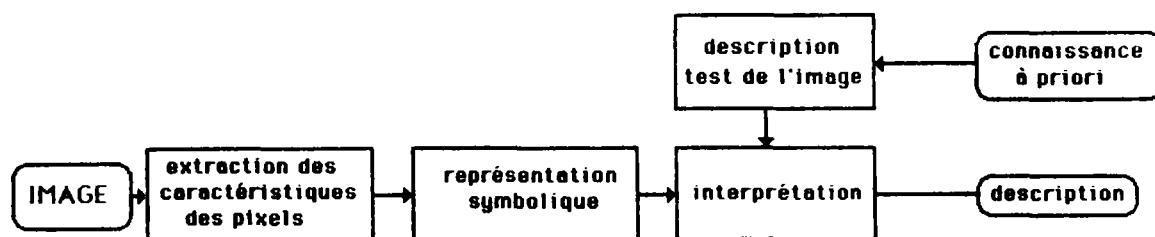


Figure 2.5 La méthode descendante

La *méthode descendante* (fig. 2.5) est dirigée par un objectif donné. L'interprétation d'une scène est guidée par des descriptions-tests tel que la recherche d'éléments identiques à un élément donné au préalable. Le résultat est alors une constatation sur la présence ou absence d'un tel élément ou bien d'une probabilité de sa présence dans l'image. Le test de présence peut se faire par une fonction du style de la corrélation croisée ou sur un niveau d'abstraction plus élevé tel que la description des symboles.

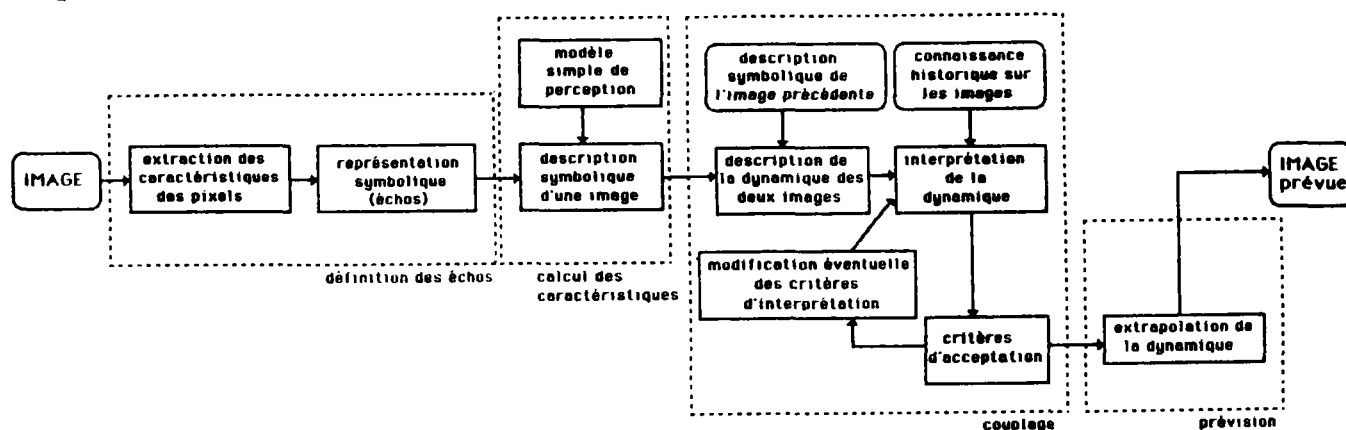


Figure 2.6: Méthode incorporant les deux approches

Dans notre approche (fig. 2.6), il faut d'abord arriver à une certaine abstraction de la description de l'image avant de faire appel à des descriptions guidées par des objectifs à atteindre. Sur ce niveau-là, la caractérisation des échos par un nombre de propriétés, on utilise la description de l'image précédente avec son histoire pour une description-test de l'image présente. La concordance entre les deux, supportée par un processus itératif de décision, donne ensuite une description du développement dynamique des images. Cette description de la dynamique des échos peut ensuite être exploitée pour faire des prévisions, par extrapolation de la dynamique dans le futur.

Pour chacune de ces parties on a le choix entre plusieurs méthodes et définitions de base (p.ex. que définir comme écho? Quelles sont les caractéristiques importantes? etc.). Cette indétermination théorique est une différence majeure d'approche avec la méthode de corrélation croisée, dont l'algorithme est parfaitement déterminé.

Les principales approches de prévision de pluie utilisant un concept de reconnaissance des formes sont décrites ensuite.

La recherche la plus proche de la nôtre aussi bien sur le plan méthodologique que par les données utilisées est celle de Blackmer et al. (1973). Ils ont travaillé sur une image de 120 x 120 points soit 14400 pixels de 4.5 sur 4.5 km. Leur pas de temps était de dix minutes et leurs échéances de 30 et 60 minutes.

Pour l'étape de définition des échos, ils utilisent un algorithme qui décide de l'appartenance d'un pixel à un écho selon que l'intensité de ce pixel est supérieur ou non à un niveau défini au préalable (cf. chap. 3.1.).

Chaque écho est identifié par son emplacement (le barycentre), sa description de forme par une technique Fourier et un "poids d'importance" par une combinaison de sa taille et son intensité moyenne.

L'identification se fait en deux temps: d'abord on applique une méthode de corrélation croisée locale à tous les échos. On utilise le plus petit rectangle qui circonscrit chaque écho et on recherche l'écho fournissant un coefficient de corrélation supérieur à un certain seuil de confiance fixé pour le couplage. Les échos non couplés sont ensuite traités par une procédure basée sur la somme des distances entre eux.

A l'étape de prévision, le vecteur utilisé tient compte des identifications précédentes, de "l'histoire" de chaque écho. Le déplacement pour la prévision est fait de telle manière qu'à chaque écho correspond une "zone de prévision" qui est plus grande que l'écho même et qui tient compte des erreurs possibles à éviter. Enfin, les coûts relatifs des erreurs de sous- et sur-estimation sont calculés.

Blackmer et al. ne se sont intéressés ni aux problèmes de modifications de la forme d'un écho ni aux échos touchant le bord de l'image.

Une étude sur le mouvement et la prévisibilité des échos radar a été faite par Wilson (1966). Même s'il a favorisé la méthode de corrélation croisée, il a analysé les caractéristiques les plus importantes pour la prévisibilité de la pluie. Il a trouvé que

"The predictability of echo patterns is directly related to the average echo intensity, echo variance, average echo size and size of the echo fine scale structures." - "... (the) predictability increases with increasing echo intensity."

On va retrouver ces caractéristiques sous les termes de masse et inertie des échos, distribution d'intensité et distance entre échos dans le chapitre 3.

Les données de Wilson étaient des photographies d'un écran radar, digitalisées en 80 x 80 pixels, chacun de 4.5 sur 4.5 km. Les mesures étaient effectuées avec un pas de temps de 20 minutes.

Une étude sur la détection et le suivi d'échos de pluie a été accomplie par Crane (1976). Son modèle est un modèle physique du processus de convection, basé sur le mouvement vertical des masses d'air observé pour des cellules convectives (cf. chapitre 4.2.1. pour une description de ce processus). Par conséquent, il n'utilise pas la définition d'un écho comme un champ pluvieux connexe qui peut être une agglomération de cellules convectives, mais pour lui, un écho est une région où l'intensité est plus forte qu'autour, ce qui isole bien ses cellules convectives. Sans faire des prévisions, il a conclu que le pas de temps des mesures doit être de l'ordre de 5 minutes au maximum, compte tenu de la durée de vie moyenne d'une cellule de 24 minutes.

Les données du satellite géostationnaire ATS-I étaient l'objet d'une étude de prévision de mouvement par Endlich (1971). Son algorithme d'agrégation est une méthode baptisée ISODATA qui fonctionne, comme l'algorithme des nuées dynamiques (cf. chap. 3.3), d'une manière itérative. Pour le déplacement des centres trouvés par ISODATA, une itération qui minimise les écart-types des vecteurs de couplage individuels par rapport au vecteur moyen de ces vecteurs individuels est employée.

Wolf et al. (1977) ont travaillé sur les données d'un autre satellite que Endlich dont ils ne jugent pas les résultats suffisamment bons. Pour cette raison, ils ont modifié les étapes de définition des échos et de couplage.

Au niveau de l'agrégation ("clustering") l'algorithme dit "touching-group" (groupe connexe) utilise les pixels voisins au sens vertical et horizontal ("8-voisins") pour définir un ensemble connexe. De plus, en cas d'échos dépassant une certaine limite, les échos trop grands sont coupés en deux, trois, etc. en élevant le niveau d'intensité de base. Cet algorithme a des performances extrêmement rapides. Les caractéristiques de la taille, du centre de gravité, de l'intensité moyenne et des moments d'inertie par rapport aux axes des coordonnées sont considérées comme les plus importantes. A partir de ces informations, un facteur de qualité est dérivé pour classer les échos et modifier les prévisions.

En Angleterre, Carpenter/Owens (1981) ont comparé les avantages respectifs d'un schéma automatique, développé par Collier/Larke (1981), et d'un schéma semi-automatique. La méthode de Collier et Larke utilise des images radar avec un pas de temps de 15 minutes. Si les couplages de leurs échos ne s'écartent pas trop du mouvement général, ils l'utilisent pour la prévision avec une échéance pouvant atteindre 6 heures. Cette méthode servait de base de comparaison à un schéma semi-automatique. Concentrés sur la prévision de crues et l'alerte d'inondations, Carpenter et Owens ont travaillé avec une résolution spatiale très faible (20 km sur 20 km par pixel et 32 x 32 pixels par image). Leurs résultats indiquent une supériorité des méthodes semi-automatiques, surtout pour les situations d'intensités fortes qui intéressent les hydrologues.

Parallèlement aux travaux en Angleterre et au Canada, le Air Force Geophysics Laboratory des Etats-Unis s'occupait du développement d'un système d'observation d'échos radar en temps réel à partir de 1975 (Bierkaas/Forsyth, 1980). Le choix de la voie "reconnaissance des formes" a été justifié par le besoin de connaissance individuelle pour des échos importants. Même si la méthode a été développée pour un radar Doppler, elle utilise plutôt les caractéristiques communes aux radars non-Doppler, notamment les caractéristiques des échos et l'utilisation d'échos tri-dimensionnels. Les objectifs de cette étude sont la prévention de dommages des matériels fragiles (avions, etc.).

Sur la ville de Chicago, l'ISWS a fait une étude qui utilise une méthode de prévision automatique de Wiggert et al. (1975), adaptée aux besoins opérationnels et améliorée par Brunkow (1980). Cette version a été conçue comme un système semi-automatique à cause de limitations en temps de calcul sur l'ordinateur utilisé. De cette manière, l'opérateur pouvait vérifier le couplage des échos (et le changer éventuellement) et aussi appliquer un facteur de croissance ou décroissance à un écho.

Ciccione/Pircher (1984) n'ont pas seulement travaillé sur les corrélations croisées binaires, mais ils ont aussi proposé une méthode simple de reconnaissance des formes. Leur résultat était tel que cette méthode, basée sur la minimisation des distances entre les centres de gravité des échos (comme l'approche de Endlich, d'ailleurs), n'apparaît pas meilleure que la méthode de corrélation croisée; ils n'ont donc pas poursuivi l'étude de cette méthode de reconnaissance des formes.

Récemment Yoshino/Kozeki (1985) ont proposé une méthode qui tient compte du développement des échos. Mais ils ont indiqué qu'ils avaient encore des problèmes avec cette technique.

Enfin, Einfalt/Schilling (1984) ont fait une étude de faisabilité pour l'utilisation de prévisions de pluie dans les régions urbaines (voir Einfalt (1983) pour une description complète). Leur travail a été à l'origine de cette recherche-ci; toutefois la majeure partie des méthodes utilisées a fait l'objet de modifications importantes (même l'étape de "définition des échos" sera différente dans sa version vectorielle finale). Ils ont travaillé sur une trentaine d'images d'un format 40 x 40 pixels où chaque pixel représente une surface de 300 par 300 m, leur pas de temps étant variable entre deux et douze minutes.

Les problèmes les plus importants rencontrés lors de l'approche "reconnaissance des formes" sont :

- l'influence du bord de l'image sur les caractéristiques des échos placés sur le bord (cf. chapitre 4.2.),
- l'identification d'échos qui se ressemblent beaucoup,
- la division et la fusion entre échos (un processus qui change toutes les caractéristiques),
- la prévision de changements de forme ou d'intensité des échos.

2.2.3. Comparaisons antérieures des approches

Plusieurs comparaisons entre les méthodes automatiques ont été effectuées, notamment celles de Harrold (1976), Elvander (1976), Collier (1978) et Ciccione/Pircher (1984).

Le premier se contente de présenter les différentes approches d'une manière très détaillée dans le cadre d'une étude préparatoire pour le système de prévision anglais. Mais les autres auteurs discutent aussi des performances obtenues par les différentes méthodes.

La première comparaison entre plusieurs concepts a été faite par Elvander. Il passe en revue les études et analyse les performances des modèles de Austin/Bellon (1974), de Blackmer et al. (1973) et de Barclay/Wilk (1970). Utilisant cinq événements, il conclut que la méthode de corrélation croisée donne de meilleurs résultats en utilisant le Critical Success Index comme critère (cf. chapitre 7). Selon cette étude, les résultats des autres méthodes ne justifient pas leur complexité supérieure.

Collier étudie trois approches:

- une approche "reconnaissance des formes" simple déplaçant les barycentres des échos,
- celle de Blackmer, qui, plus complexe, dispose de plus d'outils comme la transformée de Fourier, la corrélation croisée et des processus de récupération d'échos "perdus" et
- l'approche de la corrélation croisée de Austin et Bellon.

| méthode de prévision | références principales | situations météorologiques pour lesquelles la méthode marche bien | descript. des échos ? | capacité à suivre des cellules individuelles | à suivre des déplacements anisotropes | besoins en stockage (16 bit mots) | besoins en temps de calcul (PDP 11) |
|--|--|--|-----------------------------|--|--|---|--|
| corrélation croisée (i) écran total | Austin/Bellon (1974, 1978) | toutes | aucune | non | non | ca. 16K | 15 sec |
| (ii) écran partiel | Harrold (1975) | toutes | très limité | oui, si les régions sont assez petites | oui, | ca. 24K | 90 sec |
| centre de gravité | Wolf et al. (1977) | convective sélection de niveau et clustering permettent l'utilisation pour d'autres situations | limité | oui | oui | ca. 24K | 30 sec (200 sec. si complex) |
| centres de gravité, ponderés par une procédure des moindre carrées ou des erreurs absolues | Blackmer et al. (1973), Ostlund (1974) | | détaillée | oui | oui | > 32K | 2 - 10 mn dépend de la complexité |

Tableau 2.1 Comparaison des techniques automatiques pour la prévision de pluie par radar (après Collier, 1978)

Les résultats de Collier concernent les besoins de ces méthodes en temps de calcul et en stockage, et il définit le domaine d'application de chacune (tableau 2.1); enfin il conclut qu'aucune de ces méthodes n'est supérieure aux deux autres.

En revanche, Ciccione/Pircher ont rejeté le choix de leur méthode de reconnaissance des formes à cause d'une performance insuffisante pour les situations frontales et d'une extrême sensibilité aux défauts des données. En outre la définition du centre de gravité ne leur paraissait pas assez représentative de la position réelle d'un écho. Mais ils n'ont étudié qu'une seule méthode du genre "études du déplacement des centres de gravité", ce qui ne permet pas de généraliser leurs résultats à toutes les méthodes de reconnaissance des formes.

Généralement, les points positifs de la méthode de corrélation croisée sont

- + elle est simple,
- + elle est robuste dans la plupart des cas,

Mais cette méthode est limitée, comme on l'a vu (cf. 2.2.1.)

- elle ne peut pas détecter les échos fixes, ni les déplacements anisotropes,
- une prévision de changement de forme ou d'intensité n'est possible qu'en mode interactif ou automatiquement que par un supplément méthodologique qui est proche des méthodes de la reconnaissance des formes,
- le temps de calcul peut être très élevé si l'on garde la résolution et l'étendue de l'image, ce qui nous paraît utile dans notre application.

Pour les méthodes de reconnaissance des formes on trouve les avantages suivants :

- + elles sont plus intuitives,
- + elles sont rapides à calculer et la complexité d'un algorithme ne joue pas sur le temps de calcul,
- + elles donnent la possibilité de suivre les mouvements anisotropes des échos,

- + on peut plus facilement isoler et traiter les échos fixes,
- + elles permettent un suivi et une prévision individuelle pour chaque écho.

Mais elles présentent aussi des inconvénients :

- le bord de l'image crée une frontière artificielle, qui peut tronquer des échos et de cette manière modifier leurs caractéristiques (cf. 4.2.)
- la bonne identification des échos n'est pas garantie,
- la méthode de prévision de changements des formes en principe possible est difficile à mettre au point.

Nous travaillerons par la suite sur les méthodes de reconnaissance des formes, car elles présentent un champ d'investigation largement inexploré allant au-delà des méthodes citées plus haut. De plus, elles présentent pour la satisfaction des objectifs de l'hydrologie urbaine (cf. chap. 1) des potentialités supérieures à celles des méthodes semi-automatiques et de la méthode de corrélation croisée, parce qu'elles

- donnent une étude particulière du comportement des échos les plus menaçants,
- sont adaptées aux cas de mouvement anisotrope et de croissance et décroissance,
- se concentrent automatiquement sur les pluies fortes,
- utilisent quelques facteurs météorologiques pour améliorer la prévision,
- permettent une éventuelle calibration par écho selon son importance.

**DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION ET CONSTRUCTION D'UNE NOUVELLE
METHODE AUTOMATIQUE DE PREVISION RADAR**

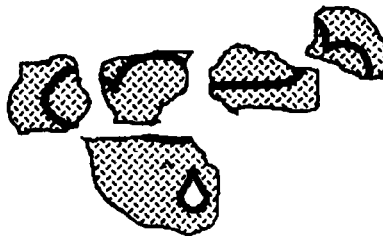
Cette partie décrit le mode de construction d'une méthode nouvelle, qui n'est pas linéaire et que l'on va présenter de deux manières:

- la première part des outils théoriques de la reconnaissance des formes et montre comment ils prennent en compte des caractéristiques propres aux phénomènes naturels de précipitation et à la mesure radar,

- la seconde considère les caractéristiques du problème posé qui ne sont pas apparues dans le chapitre précédent et présente soit les adaptations de la méthode pour les prendre en compte, soit les limites de la méthode lorsque ces caractéristiques ne sont pas prises en compte.

CHAPITRE 3

OUTILS METHODOLOGIQUES



Malgré la variété des méthodes développées en intelligence artificielle et plus précisément en traitement d'image, la nature des données radar ne permet l'utilisation que d'un nombre limité d'entre elles. Les obstacles principaux sont notamment :

- les échos de pluie changent de forme,
- ils changent d'intensité,
- ils changent de taille,
- ils se divisent et fusionnent.

Cela rend déjà impossible l'utilisation des techniques de l'analyse de texture, d'extraction des bordures et leurs descriptions (transformée de Fourier, transformée de Hough, etc), de suivi de formes primitives, de description linguistique, etc. car toutes ces méthodes sont soit seulement applicables à des objets rigides soit elles demandent une formalisation stricte des processus dynamiques de changement de formes.

Il y a cependant quelques méthodes qui rentrent parfaitement dans le cadre du problème étudié. Ainsi on trouvera des méthodes du domaine de la "classification automatique" qui s'appliquent à la caractérisation d'une image ainsi que des outils bien adaptés pour le traitement de deux images.

La présentation des outils va s'effectuer par étape, telle qu'elles ont été définies au chapitre 2.2.2. pour toute méthode de reconnaissance des formes (fig. 3.1).

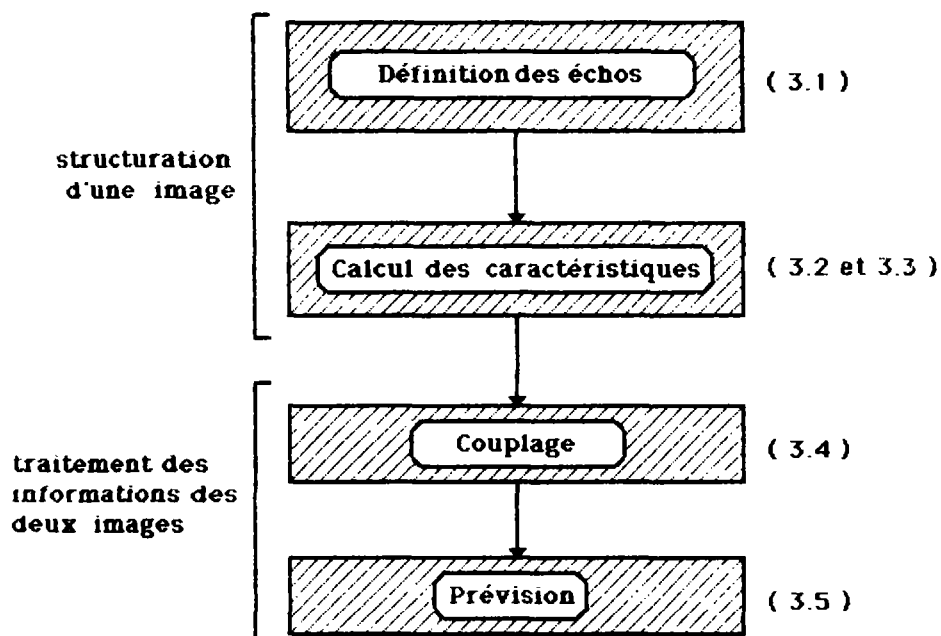


Figure 3.1: Les quatre étapes de prévision par reconnaissance des formes

3.1. L'agrégation ("clustering") ou la définition des échos (1ère étape)

Intuitivement, un "écho" devrait être une structure pluvieuse connexe qui montre un comportement homogène et stable sur une certaine durée autorisant une éventuelle prévision sur cette durée. Ces structures, souvent appelées cellules, ont été fréquemment observés par les physiciens de l'atmosphère.

La définition algorithmique d'un écho donnée au chapitre 2.2 à partir des pixels radar ne pourra pas représenter parfaitement cette cellule, car l'utilisation du radar pose des problèmes de perception de la cellule:

- à partir de quel niveau d'intensité ou de réflectivité parle-t-on d'un pixel pluvieux appartenant à la cellule?
- comment lie-t-on les pixels pour obtenir une cellule?

La réponse à la première question dépend tout d'abord de la discrétisation et de la nature des données (intensité, réflectivité). On doit choisir ce niveau critique tel qu'il n'y ait pas de perte d'information ni trop d'informations à traiter. Donc il est évident qu'un niveau trop haut sépare artificiellement certains échos et ces fractions d'échos deviennent intraitables, et qu'un niveau trop bas entraîne des pertes d'informations sur la structure détaillée d'une situation pluvieuse. Ce niveau varie avec la situation météorologique: en cas de grandes structures il est préférable de travailler sur un niveau plus haut qu'en cas de plusieurs petites. En outre, il faut se concentrer sur les informations intéressantes pour l'application envisagée, par exemple dans notre cas sur les moyennes ou fortes intensités (> 1 mm/h ou > 5 mm/h).

La réponse à la deuxième question est fortement liée à la théorie de l'agrégation, dite "clustering" dans la littérature anglaise. Là on cherche des règles permettant de savoir quand on peut réunir des ensembles de points. En général on applique la technique suivante :

Algorithme (3.1.)

Soit $A = \{ A_i, i = 1, n \}$ un ensemble fini de points répartis dans un espace métrique. Chaque élément de A représente un pixel pluvieux; soit $R(x,y)$ une distance entre deux éléments de A .

Sur ces éléments, on applique l'algorithme suivant:

```
(1)  $i := 1, j := i$ 
(2)  $j := j + 1$ 
(3) si  $A_j$  a déjà été agrégé --> (2)
(4) si  $j > n$  -->  $i := i + 1, j := i$  --> (2)
(5) si  $R(A_i, A_j) < r_{max}$  :  $A_i := A_i \cup A_j$  et  $A_j := \emptyset$ 
(6) si  $i = n, j = n$  --> FIN
    sinon --> (2)
```

Cet algorithme regroupe dans des ensembles connexes tous les pixels qui sont connexes au sens de la fonction $R(x,y)$. On arrive finalement à un ensemble de groupes connexes, des échos.

A priori il y a un grand nombre de ces techniques qui toutes reposent sur des définitions de R différentes. Prenons trois exemples :

(1) Deux points d'un niveau strictement supérieur à 3 sont voisins

- s'ils se touchent directement ou
- s'ils se touchent diagonalement ou
- s'il n'existe entre eux qu'un point (et un seul) de niveau 3

Cette définition (Blackmer et al., 1973) donne pour le cas de figure 3.2a deux échos (fig. 3.2b) comme résultat.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| 3 | 5 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 2 | 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| 3 | 5 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 2 | 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

Figure 3.2 a

Figure 3.2 b

Définition des échos (d'après Blackmer)

(2) Deux points sont voisins et appartiennent au même ensemble

- s'ils se touchent soit directement soit diagonalement (fig. 3.3a) (8-connexité)

Cette technique est le algorithme dit de "touching-group" de Wolf et al. (1977).

(3) Une variante plus simple de cette définition conduit à un algorithme deux fois plus rapide qui ne permet que des voisins 4-connexes qui se touchent directement (fig. 3.3b).

| | | |
|---|---|---|
| o | o | o |
| o | X | o |
| o | o | o |

Figure 3.3a
8-voisinage
utilisé par Wolf

| | | |
|---|---|---|
| | o | |
| o | X | o |
| | o | |

Figure 3.3b
4-voisinage,
utilisé par Einfalt(1983)

A cause de la restriction du temps de calcul permis (chap.1) nous utiliserons préférentiellement l'algorithme no.(3). Ce choix de cette définition tient compte des réflexions de Rosenfeld/Kak (1982) sur le développement d'un algorithme rapide.

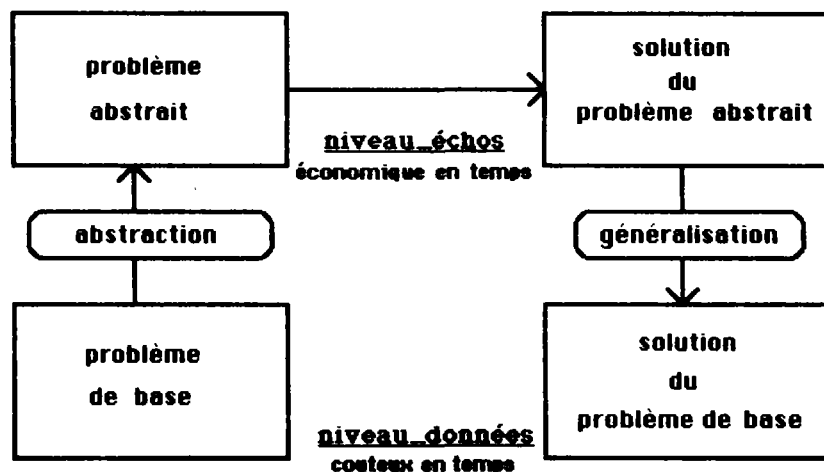


Figure 3.4: Les niveaux d'abstraction utilisés

3.2. Caractérisation des échos (2e étape)

Le clustering change le niveau d'abstraction du problème. On passe alors du niveau des données (brutes) au niveau des échos (fig. 3.4).

Cohen et Feigenbaum (1982) distinguent 3 niveaux de perception (ou d'abstraction) pour retrouver les objets d'une image sur une autre :

- l'intensité des pixels,
- les caractéristiques de portions de l'image (appelées régions),
- les caractéristiques d'un objet connu a priori.

Au premier niveau de perception, on peut déduire un mouvement du changement de la valeur grise d'un pixel, basé sur la connaissance locale et d'une connaissance supplémentaire, aidant à interpréter un tel changement. Un exemple de ce cas est un objet, dont les cotés sont éclairés différemment selon leur orientation vers le soleil. Le changement de la valeur grise de pixels sur un coté clair peut alors être interprété comme mouvement de l'objet en question. Ceci est utilisé en analyse d'images vidéo.

Le deuxième niveau est plutôt utile pour des objets d'une forme non-déterminée ou changeante comme des nuages vus par un satellite, les échos de pluie mesurés par radar ou les éclats d'obus vus par une caméra vidéo à haute vitesse.

Le troisième niveau est basé sur la connaissance à priori de la forme d'un objet comme l'analyse de scènes du monde des blocs (cf. Winograd, 1967) ou l'analyse d'images pour retrouver un objet donné.

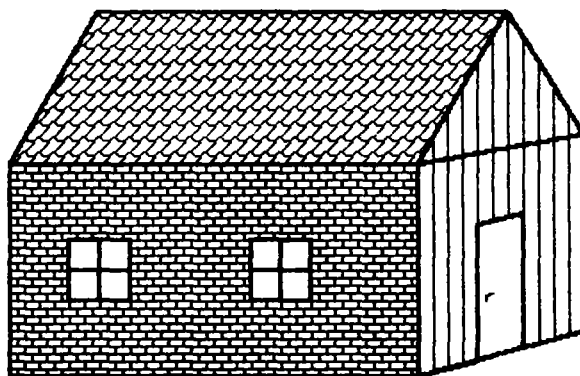


Figure 3.5: Une maison

Prenons un petit exemple de plusieurs niveaux de perception. Sur un dessin (fig. 3.5), on peut regarder tous les petits pixels et leurs niveaux gris pour comprendre l'objet présenté. Mais normalement l'oeil humain définit des entités plus abstraites, par exemple à partir d'une surface d'un même niveau gris ou d'une même texture. Alors, l'homme est capable de distinguer entre murs, fenêtres, toits, ... et il reconnaît l'ensemble comme une maison par l'analyse de ces entités plus abstraites, leur composition ou la forme générale.

Pour les échos de pluie, la tâche est assez proche: l'ordinateur calcule facilement au niveau des données brutes, mais pour reconnaître la forme d'un écho, il a besoin - sur un niveau d'abstraction plus élevé - d'une quantification des attributs caractéristiques de chaque écho. Sinon les calculs ultérieurs devraient se faire en conservant la liste des pixels composant chaque écho.

La caractérisation des échos dépend largement

- de l'utilisation envisagée et
- de la vue subjective des prévisionnistes.

Une discussion très complète pour le choix d'une caractérisation d'une image et de ses éléments est à trouver dans Coster/Chermant (1985). Ils développent à partir d'un point de vue de l'analyse des matériaux tout un ensemble d'instruments : partant des propriétés métriques et topologiques simples comme la taille et la connexité, ils décrivent la morphologie mathématique (la mathématique de transformations liées aux formes d'objets - cf. annexe 5) et la granulométrie, qui est l'analyse de la distribution en taille des éléments d'une image.

En ce qui concerne la description de formes d'éléments, ils soulignent qu'il n'y a pas une solution générale. Les approches sont, selon eux, pour la plupart descriptives, utilisant souvent une forme géométrique simple mais parfaitement définie comme approximation d'une forme donnée. On arrive ainsi à des descriptions grossières, comme le diamètre, le périmètre, l'allongement, des descriptions d'information transformée, comme la squelettisation, l'érosion ou la dilatation et à des descriptions détaillées comme l'analyse de Fourier ou l'analyse microscopique (par exemple : le "chaîne-code" de Freeman) qui seront présentées dans l'annexe 5.

Le tableau 3-1 présente un grand nombre de possibilités de caractérisation, citées dans les recherches déjà effectuées sur les images radar.

| | |
|---|--|
| ♦ la taille (*, Wi, C, B, Wo, E, Y) | $A = \sum_{i \in W} 1$ |
| ♦ la masse (flux) (*, E) | $m = \sum_{i \in W} m(i)$ |
| ♦ le centre de gravité (*, C, Wo, B, E, Y) | $(c_x, c_y) = \frac{1}{A} \sum_{i \in W} i m(i)$ |
| ♦ la transformée de Fourier (B) | |
| ♦ l'ancien vecteur de déplacement (*, B, E, Wo) | v'_{t-1} |
| ♦ le nombre de couplages précédents (*, B) | |
| ♦ le diamètre maximal (Wo) | |
| ♦ l'intensité moyenne (Wi, Wo) | $\bar{m} = \frac{m}{A}$ |
| ♦ les moments d'inertie par rapport aux axes X et Y (Wo) | $S_x = \sum_{i \in W} (c_x - i_x)^2 m(i)$ |
| ♦ le centre géométrique | $z = \frac{1}{A} \sum_{i \in W} i$ |
| ♦ le point d'intensité maximale | |
| ♦ le moment d'inertie (*, E) | |
| | $J_{\max} = \frac{S_x + S_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(S_x - S_y)^2 + 4 S_{xy}^2}$ |
| ♦ l'angle de l'axe principale d'inertie avec l'axe X (*, E) | |
| | $\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_{xy}}{S_y - S_x} \right)$ |
| ♦ la variance de l'intensité (Wi) | $v_i = \frac{1}{A} \sum_{i \in W} (m(i) - \bar{m})^2$ |
| ♦ la distribution d'intensité (*) | |
| ♦ l'indice de croissance en taille et en intensité (*) | $\frac{A_t}{A_{t-1}}$ |
| ♦ les structures à l'intérieur d'un écho (Wi) | |
| où | |
| | S_{xy} = le moment de déviation |
| | W = l'écho |
| | i = un élément de l'écho (de coordonnées (x,y)) |
| | $m(i)$ = l'intensité au point i |

Tableau 3.1 Quelques caractéristiques importantes d'un écho

(les lettres en parenthèses donnent les auteurs qui ont déjà utilisé ces indicateurs et l'étoile (*) indique l'utilisation dans cette recherche. C - Ciccione et Pircher; B - Blackmer; Wi - Wilson; Wo - Wolf; Y - Yoshino et Kozeki; E - Einfalt et Schilling)

Dans la littérature qui touche les domaines de recherche voisins, on trouve dans l'analyse des galaxies des descriptions sémantiques comme "CLOSE-TO", "FAR-FROM", etc. (Granger, 1986), le périmètre et le diamètre maximal (Di Gesu/Maccarone, 1986) ou la compacité et l'écart-type de la densité (Gandelin/Thonnat, 1987), utilisés en reconnaissance des zooplanctons.

De cette façon, on arrive à un nombre assez élevé de paramètres possibles pour la description d'un écho. Le choix des paramètres va alors être soumis à des conditions liées à la nature des échos. Un tel paramètre doit accumuler le maximum d'informations avec un minimum de risques d'erreur. Cela signifie que tout paramètre susceptible de changement important dû à la variation naturelle d'un écho doit être écarté.

Pour cette recherche on a choisi les neuf caractéristiques marquées par (*) dans le tableau 3.1, qui sont soit :

- des caractéristiques géométriques, soit
- des caractéristiques historiques.

On a donc retenu six paramètres d'identification géométrique :

- les coordonnées de centre de gravité, pour localiser l'écho,
- des descripteurs statistiques (taille, masse, distribution d'intensité) et,
- des descripteurs de formes (l'élongation et l'axe d'orientation).

A la place de la masse, on aurait pu choisir l'intensité moyenne d'un écho, ce qui est équivalent au choix de la taille et la masse. On vérifie rapidement que tous ces paramètres ne sont pas sensibles aux variations mineures. Les descripteurs de formes ont été choisis dans la perspective d'un descripteur simple qui ne soit pas trop sensible à des variations naturelles d'un écho. Cette solution-ci nous paraît être la plus simple, vu la complexité des processus physiques dans les nuages (cf. chapitre 4).

Les quatre autres caractéristiques assurent le suivi historique et évolutif d'un écho :

- le nombre de couplages précédents,
- l'indice de croissance en taille et en intensité moyenne,
- l'ancien vecteur de déplacement.

C'est le minimum de paramètres à utiliser si on veut étudier à la fois la forme d'un écho et son évolution.

3.3. L'introduction d'échos "imaginaires"

Pour tenir compte de la difficulté de perception vraie d'une structure pluvieuse à l'aide du seul radar, il a paru indispensable de créer des entités agglomérant les échos de base lorsqu'ils sont suffisamment proches pour prétendre se comporter comme une cellule pluvieuse. Nous allons maintenant expliciter une procédure d'agrégation qui a des liens avec les théories classiques en reconnaissance des formes.

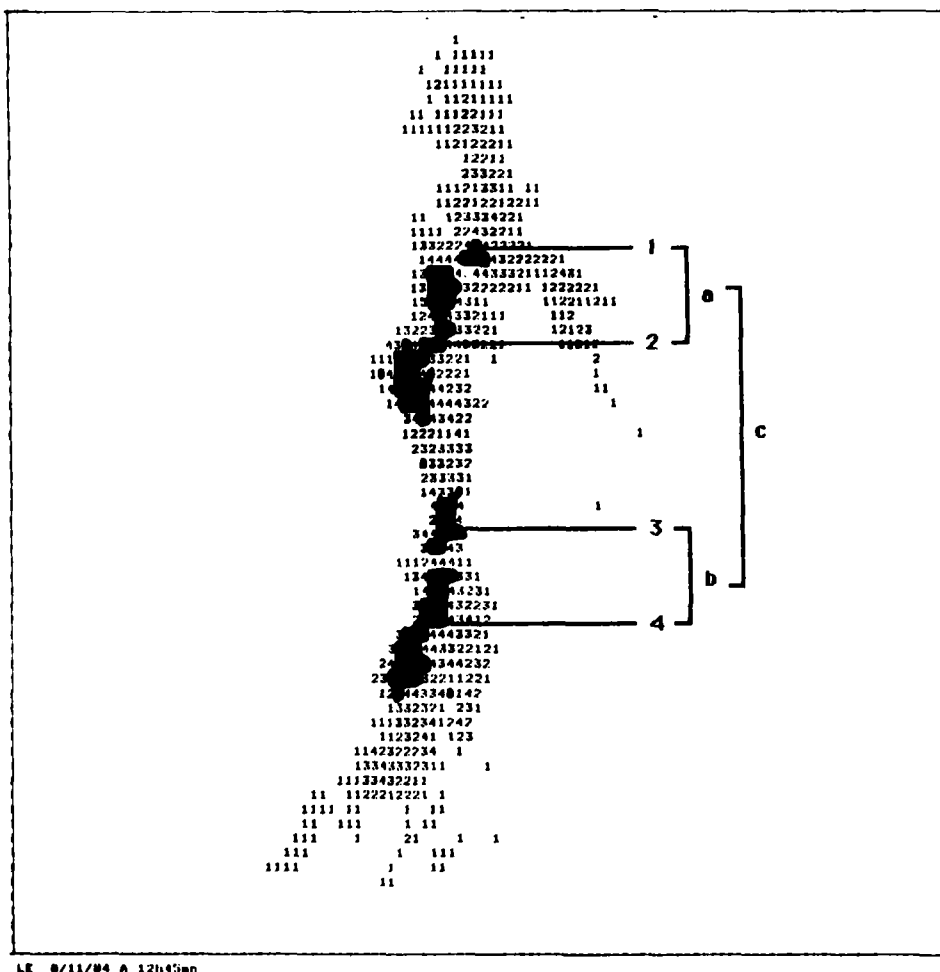


Figure 3.6 : Le 8 novembre 1984, 12h45 TU, (niveau > 4)

3.3.1. Approche intuitive de l'agrégation d'échos

Nous partirons de la situation réelle, représentée par les figures 3.6 et 3.7. Sur l'image 3.6, on perçoit que les deux échos 1 et 2 sont très proches. On peut alors s'imaginer qu'ils se déplacent et évoluent d'une manière semblable, parce qu'ils font partie d'une "zone de comportement" commune. Par zone de comportement nous désignons une région dans laquelle tous les échos ont le même comportement. Dans une telle zone on peut agréger les différents échos pour en former un seul. Cette notion n'est pas une idée totalement subjective car on observe souvent des échos proches qui se comportent similairement. Or, la taille et la forme d'une telle zone varie selon la situation météorologique et selon la définition précise de "similarité".

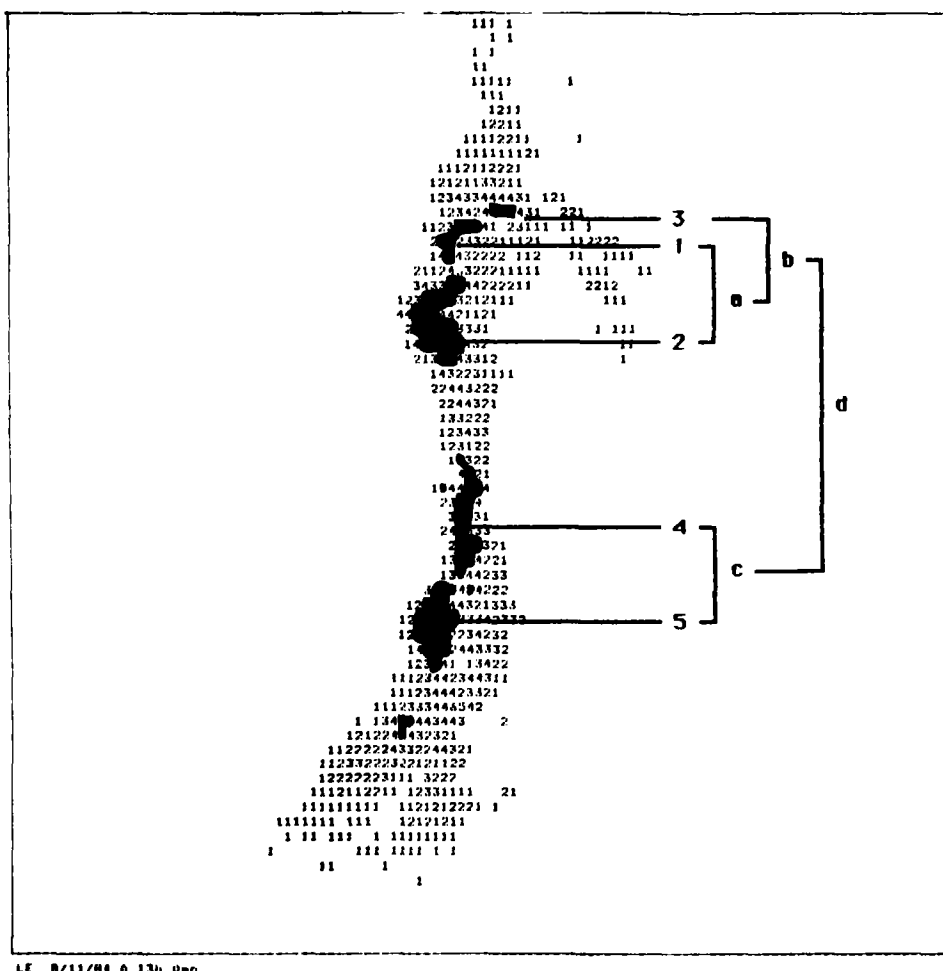


Figure 3.7: Le 8 novembre 1984, 13h00 TU, (niveau > 4)

En contrepartie, le comportement des échos 1 et 4 sera plus différent, à cause de leur distance spatiale et de leur localisation très différente dans la structure météorologique générale (figure 3.7).

On se rend facilement compte que le même traitement pour des échos négligeables ou bien séparés n'est pas à envisager. Pour cette raison, il convient de choisir un écart entre deux échos qui prennent en compte à la fois la distance euclidienne et à la fois l'importance de chaque écho.

3.3.2. Choix d'un écart entre échos

Considérons encore le cas illustré par les figures 3.6 et 3.7 où les échos changent de formes et se séparent ou fusionnent. Pour reconnaître les échos 1 et 2 de la figure 3.7 dans la figure 3.6, on a besoin :

- soit de réunir les échos 1 et 2 artificiellement,
- soit de séparer l'écho 2 de la figure 3.6 en deux parties.

Nous avons choisi la première possibilité parce qu'il existe une théorie plus complète de ce problème dans le domaine de l'analyse des données. Une approche qui sépare les grands échos en morceaux plus petits serait une méthode qui utiliserait l'érosion ou "le squelette" d'un écho (Coster/Chermant, 1985), voir annexe 5.

Pour réunir à bon escient les échos, il faut choisir une "distance" qui tienne compte de l'objectif à atteindre.

Volle (1981) propose plusieurs mesures d'écart possibles, parmi lesquelles on trouve premièrement la distance euclidienne :

$$d_1(e_i, e_j) = ||c_i - c_j||^2$$

Une deuxième fonction

$$d_2(e_i, e_j) = \frac{m_i * m_j}{m_i + m_j} ||c_i - c_j||^2$$

minimise la perte en inertie interne de e_i ou e_j vis-à-vis de $J(e_i) + J(e_j)$. d_2 est d'autant plus faible que e_i et e_j sont plus légers.

Une autre formule qui est dérivée de la théorie de Bayes sera analysée ici, car elle ne tient pas seulement compte des masses d'échos mais aussi de leurs axes d'inertie:

$$d_3(e_i, e_j) = (a-b) (\Gamma_i + \Gamma_j)^{-1} (a-b)^T$$

où Γ_a et Γ_b sont les matrices de covariance de e_i et e_j .

Cette distance s'appelle de "Mahalanobis".

La formule

$$d_4(e_i, e_j) = \frac{m_i + m_j}{m_i * m_j} ||c_i - c_j||^2$$

utilise une pondération inverse de celle de la fonction d_2 : sa valeur est d'autant plus faible que e_i et e_j sont plus lourds.

Il faut remarquer que les fonctions d_2 et d_4 ne décrivent pas une distance puisqu'elles ne remplissent pas l'inégalité triangulaire. Alors, elles ne sont que des indices de dissimilarité pour lesquelles la condition

$$d(x,y) = 0 \implies x = y$$

est pratiquement toujours valable, parce que les barycentres de deux échos sont en réalité toujours différents. Ceci fait que les dits indices de dissimilarité deviennent des écarts.

Nous avons testé ces quatre fonctions sur un ensemble test E.

Considérant les 6 échos définis ainsi:

| | centre | poids (somme d'intensité des pixels) |
|---|--------|---|
| 1 | (3,3) | 5 |
| 2 | (11,3) | 10 |
| 3 | (3,9) | 10 |
| 4 | (3,9) | 10 |
| 5 | (11,3) | 19 |
| 6 | (11,9) | 10 |

Tableau 3.2: Les six échos test utilisés pour trouver un écart approprié

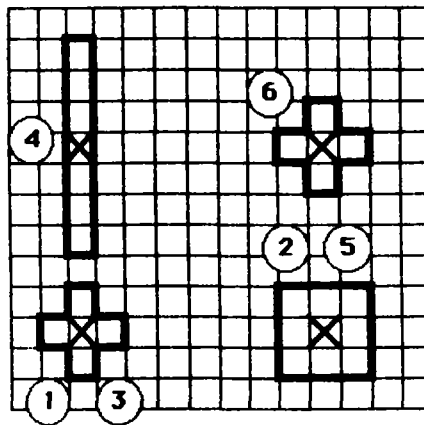


Figure 3.8: Les échos utilisés

Le calcul des écarts entre ces six échos donne les valeurs suivantes

| dist. (pixels) | échos | poids | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 |
|-------------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 6 | 1-2 | (5/10) | 36 | 120 | 36 | 10.8 |
| | 1-5 | (5/19) | 36 | 143 | 55 | 9.1 |
| | 2-3 | (10/10) | 36 | 180 | 36 | 7.2 |
| | 3-5 | (10/19) | 36 | 235 | 35 | 5.5 |
| | 4-6 | (16/10) | 36 | 221 | 90 | 5.9 |
| 8 | 1-4 | (5/16) | 64 | 244 | 22 | 16.8 |
| | 3-4 | (10/16) | 64 | 393 | 22 | 10.4 |
| | 2-6 | (10/10) | 64 | 320 | 64 | 12.8 |
| | 5-6 | (19/10) | 64 | 419 | 62 | 9.8 |
| 10 | 2-4 | (10/16) | 100 | 615 | 81 | 16.3 |
| | 4-5 | (16/19) | 100 | 868 | 77 | 11.5 |
| | 1-6 | (5/10) | 100 | 333 | 125 | 30.0 |
| | 3-6 | (10/10) | 100 | 500 | 125 | 20.0 |

Tableau 3.3.: Les écarts selon les quatre formules retenues

Nous rappelons encore que notre objectif est de trouver un écart entre échos, qui favorise les poids les plus forts: en présence d'une même distance euclidienne, les échos les plus grands sont regardés comme plus proches. D'autre part, en présence d'échos de la même importance, c'est la distance euclidienne qui joue le rôle décisif. On voit dans le tableau 3.3 que cela n'est pas le cas avec d_1 et d_2 . La distance d_3 tient compte des axes d'inertie mais elle ne favorise pas toujours les poids les plus grands (voir paires 1-2 et 2-3) (ce deuxième point est dû aux matrices de covariance, qui restent les mêmes en présence d'un élargissement homogène des valeurs de l'écho considéré).

Seule la fonction d_4 qui ne considère pas l'élongation des échos, garde bien les deux aspects masse et distance euclidienne. On retient alors cet écart avec la formule :

$$d(i,j) = \frac{m_i + m_j}{m_i * m_j} ||c_i - c_j||^2$$

Dans l'exemple cité plus haut, (fig. 3.6 et 3.7) formule donne les valeurs suivantes pour les écarts entre les échos :

$$\begin{aligned} d(1,2) &= 5.05 \\ d(4,5) &= 6.95. \end{aligned}$$

3.3.3. Choix d'une méthode d'agrégation d'échos

Dans cette partie, nous allons aborder le problème d'agrégation d'échos d'un point de vue théorique. Partant des outils classiques d'agrégation, nous présenterons leurs différences et leurs similarités, ce qui va finalement nous permettre de choisir une méthode d'agrégation. Nous allons nous baser sur une thèse de Emptoz (1983), qui a démontré des liens étroits entre la topologie et diverses méthodes en reconnaissance des formes.

3.3.3.1. Méthodes classiques de classification automatique

Sous classification automatique on comprend un processus avec cinq propriétés (Emptoz, 1983) :

- (1) le côté intuitif du problème est représenté par le choix des mesures de similarité ou dissimilarité pour la comparaison d'éléments,
- (2) tout élément est connu,
- (3) il n'y a pas d'ensemble d'apprentissage,
- (4) un algorithme détermine, si un élément fait partie d'une classe,
- (5) les classes sont telles qu'à l'intérieur de chaque classe le degré d'"association naturelle" est élevé, tandis qu'il ne l'est pas entre différentes classes.

Cette définition permet naturellement beaucoup de différentes méthodes de classification, distinctes notamment par leur choix de la mesure de similarité (1), leur choix d'appartenance à une classe (4) et la décision qui sépare des classes (5). D'autre part, tous les algorithmes de ce style ont un fonctionnement semblable; les différences sont dûes aux applications envisagées ou à la philosophie sous-jacente à leurs définitions.

Nous allons maintenant présenter trois d'entre eux:

- l'algorithme des k - plus proches voisins,
- l'algorithme des ϵ - voisins, et
- l'algorithme des nuées dynamiques.

Par la suite, E sera un ensemble d'éléments e_i et C l'ensemble des classes c_j , $d(.,.)$ est une distance ou une mesure de dissimilarité (ou similarité) ou un écart entre deux éléments ou deux classes ou un élément et une classe.

3.3.3.1.1. L'algorithme des k-plus proches voisins

Soit $k \geq 2$, on définit comme l'ensemble des k-plus proches voisins de e_i dans E

$$P_k(e_i) = \{e_j \in E \mid d(e_i, e_j) \leq d(e_i, e_n) \forall e_n \in E \setminus P_k(e_i)\}$$

avec

$\text{card}(P_k(e_i)) = k$ le nombre d'éléments de cet ensemble.

$P_k(e_i)$ décrit alors les k éléments de E qui sont les plus proches à e_i au sens de la mesure d . Dans cette définition, $P_k(e_i)$ n'est jamais vide, parce que $\{e_i\}$ fait toujours partie de $P_k(e_i)$.

Par contre, si $(e_j) \in P_k(e_i)$, on ne peut pas dire que $(e_i) \in P_k(e_j)$ comme le montre la figure 3.9.

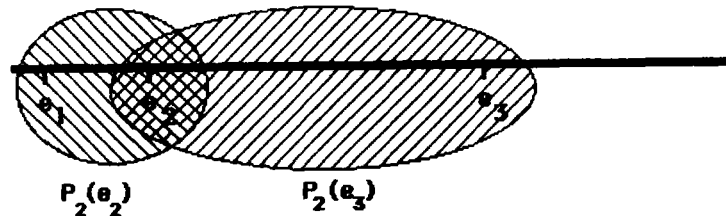


Figure 3.9

Pour pouvoir appliquer une fonction d'ordre sur les e_i , il faut définir une fonction $S_k(e_i)$ du style

$$S_k(e_i) = \max_{e_j \in P_k(e_i)} d(e_i, e_j)$$

Ensuite on peut directement décrire l'algorithme (3.2.):

Prétraitement

* $\forall e_i \in E$:

- détermination de $P_k(e_i)$
- calcul de $S_k(e_i)$

* tri des $e_i \in E$ selon l'ordre induit par les $S_k(e_i)$ dans un tableau T .

Groupement

- (1) $i := 0$
 soit e le premier élément de T
 $U := T \setminus \{e\}$
 $\rightarrow (2)$
- (2) $i := i+1$
 e crée la classe c_i et y entraîne les éléments de $P_k(e)$ pas encore classés
 $k_o := i$
 $\rightarrow (4)$
- (3) $c_{k_o} := c_{k_o} \cup (P_k(e) \cap \overline{\bigcup_j c_j})$
 on ajoute à c_{k_o} les éléments non classés de $P_k(e)$
- (4) $U := U \setminus (P_k(e) \cap (C \setminus \{c_{k_o}\}))$
 on supprime de la table U les valeurs qui correspondent à un élément de $P_k(e)$ juste classé dans c_{k_o} .
 si $U = \emptyset \rightarrow (5)$
sinon : soit e le premier élément de U
 si $\exists k_o : e \in c_{k_o} \rightarrow (3)$
 sinon : $\rightarrow (2)$
- (5) fin.

Cet algorithme

- crée une partition,
- est contrôlé par le paramètre de perception k ,
- ne détermine pas le nombre de classes au début.

On groupe alors les éléments dans des classes sans regarder si les éléments des ensembles $P_k(e_i)$ dépassent une certaine distance de e_i . Chaque ensemble $P_k(e_i)$ dispose par définition du même nombre d'éléments.

3.3.3.1.2. L'algorithme des ϵ -voisins

Dans cet algorithme, on inverse les fonctions du nombre d'éléments et de la mesure de dissimilarité (ou similarité) :

Soit (E, d) un espace métrique, $\epsilon \in \mathbb{R}^+$; l'ensemble des ϵ -voisins de e_i est

$$P_\epsilon(e_i) = \{e_j \in E \mid d(e_i, e_j) \leq \epsilon\}$$

la fonction $\delta_\epsilon(e_i) = \text{card}(P_\epsilon(e_i))$ décrit le nombre d'éléments de $P_\epsilon(e_i)$.

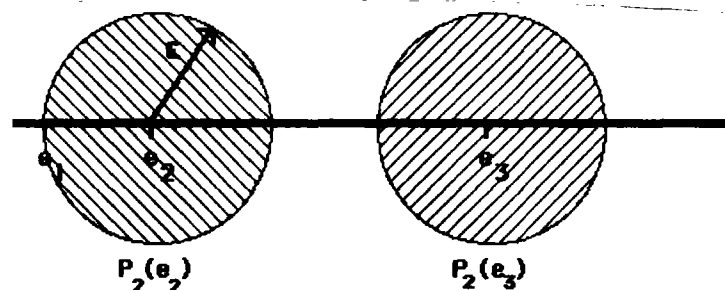


Figure 3.10

A cause de la symétrie de d , on trouve ici (fig. 3.10)

$$\{e_j\} \in P_\epsilon(e_i) \Leftrightarrow \{e_i\} \in P_\epsilon(e_j)$$

Pour l'algorithme (3.3) il faut encore définir les points frontières: ce sont ceux qui font partie de plusieurs ensembles $P_\epsilon(e_i)$.

Prétraitement

- * $\forall e_i \in E$
 - déterminer $P_\epsilon(e_i)$
 - calculer $\delta_\epsilon(e_i)$
- * tri des $e_i \in E$ selon l'ordre induit par $\delta_\epsilon(e_i)$ dans un tableau T
- * définition de la classe
 $ISOLES := \{c_i \in E \mid \delta_\epsilon(e_i) = 1\}$
- * si $U := T-ISOLES = \emptyset \rightarrow (5)$
 sinon $\rightarrow (1)$

Groupement

- (1) $i := 0$
 soit e le premier élément dans U
 $U := U \setminus \{e\}$
 $\rightarrow (2)$
- (2) $i := i + 1$
 e crée la classe i et y entraîne les éléments de $P_\epsilon(e)$
 $\rightarrow (4)$
- (3) $c_k := c_k \cup P_\epsilon(e)$

```

(4) si  $U = \emptyset \rightarrow (5)$ 
    sinon : soit  $e$  premier élément de  $U$ 
         $U := U \setminus \{e\}$ 
        -  $\exists k \in \{1, i\} : e \in c_k \rightarrow (2)$  ( $e$  non-classé)
        -  $\exists k \in \{1, i\} : e \in c_k \rightarrow (3)$  ( $e$  déjà classé)
        - sinon  $e$  est point frontière  $\rightarrow (4)$ 

(5) fin.

```

Cet algorithme classe tous les points dans les catégories ISOLÉS, points frontières et points qui appartiennent à une seule classe. Il utilise la valeur ϵ comme paramètre de contrôle de perception.

Chaque ensemble $P_\epsilon(e_i)$ dispose d'un nombre d'éléments qui n'est pas déterminé au préalable. En revanche, c'est une distance maximale qui est choisie comme moyen de séparation entre les classes.

3.3.3.1.3. L'algorithme des nuées dynamiques

Cette méthode (Diday, 1974) est basée sur une alternance de représentants des classes à calculer et de classes à former autour de ces représentants. Pour cette raison, le nombre de classes est choisi au départ, et il ne change pas pendant l'algorithme. On cherche alors quasiment une meilleure classification d'un ensemble donné en un nombre de classes fixe.

Prétraitement

- * détermination du nombre k de classes
- * détermination d'un nombre n d'éléments représentatifs de chaque classe
- * choix du mode de représentation adéquate (par exemple barycentre, un certain nombre de points, ...), le "noyau" pour chaque classe c_i
- * choix de k représentants r_i pour les classes à former parmi les $e_j \in E$
- * choix d'un seuil d'arrêt $d_{\text{arrêt}}$

Groupement

(1) (fonction d'affectation)

$R = \{r_1, \dots, r_n\}$ étant donné, $C = \{c_1, \dots, c_n\}$ se définit comme suit :

$$c_i := \{e_m \in E \mid d(r_i, e_m) \leq d(r_j, e_m) \forall j \in [1, \dots, k]\}$$

(2) (fonction de représentation)

$C = \{c_1, \dots, c_k\}$ étant donné, on en déduit les r_1, \dots, r_k de la façon suivante :

$$r_i := \{e_j \in E \mid e_j \in E^*\}$$

$$\text{et } E^* := \{e_n \in E \mid d(E^*, c_i) \leq (E^{**}, c_i),$$

$$E^{**} := E^* \setminus \{e_n\} \cup \{e_1 \in E^*\}$$

(3) (test d'arrêt)

si une condition d'arrêt est valide (par exemple

$d(r_i, c_i) \leq d_{\text{arrêt}} \rightarrow (4)$

sinon : $\rightarrow (1)$

(4) fin.

Cet algorithme optimise alors un critère lié à la mesure de dissemblance utilisée sur un nombre donné de classes. Les classes, elles, ne disposent pas nécessairement du même nombre d'éléments.

3.3.3.2. Le cadre théorique de notre approche intuitive

L'utilisation envisagée exige de l'algorithme final un certain nombre de propriétés :

- (a) le nombre de classes final ne peut être fixé, car il varie grandement d'une situation météorologique à l'autre (les images utilisées peuvent ne contenir qu'un écho ou plus de 90),
- (b) l'existence la plus probable d'une structure pluvieuse en réalité est celle qui regroupe en un écho imaginaire les deux échos les plus proches; donc la décision d'agrégation ne peut être liée qu'aux deux échos présentant le minimum d'écart,
- une nouvelle décision d'agrégation ne peut s'opérer qu'à partir des structures pluvieuses déjà définies, incluant donc les échos imaginaires précédemment identifiés, ce qui implique:
 - (c) l'agrégation de deux échos seulement à chaque décision,
 - (d) le recalcul des écarts en considérant le nouvel écho imaginaire.

La condition (a) écarte déjà l'utilisation de la méthode des nuées dynamiques, (c) celle des ϵ -voisins et (b) celle des k-plus proches voisins.

Il faut donc choisir une méthode moins classique; il n'est toutefois pas nécessaire de s'écarter loin des méthodes classiques présentées. Un panachage des algorithmes des voisins est possible pour tenir compte des propriétés demandées à la méthode: on peut l'appeler "méthode répétée n-fois du plus proche ϵ -voisin", puisque k est fixé étant 2 et après chaque agrégation on recalcule les écarts entre les échos. Le nombre de répétition est au plus égal à n, et il peut être inférieure si tous les écarts sont supérieures à ϵ .

Pour cette raison, on a:

$$P_{\epsilon}^2(e_i) = \{e_j \in E \mid \min_{e_j \neq e_i} d(e_i, e_j), d(e_i, e_j) \leq \epsilon\}$$

Comme dans 3.3.3.1.1. on trouve que généralement

$$\{e_i\} \in P_{\epsilon}^2(e_j) \not\Rightarrow \{e_j\} \in P_{\epsilon}^2(e_i),$$

mais pour l'écart minimal $\min_{e_i \in E} S_2(e_i)$ on trouve à cause de la

symétrie de d que cette équivalence est valide. $S_2(e_i)$ est ici une fonction qui ne considère pas les points isolés de E; on accorde alors à $S_2(e_i)$ la valeur ∞ dans ce cas.

Schématiquement, l'algorithme (3.5.) se présente de la façon suivante :

Prétraitement

- * $\forall e_i \in E$
 - détermination de $P_{\epsilon}^2(e_i)$
 - calcul de $S_2(e_i)$
- * tri des $e_i \in E$ selon l'ordre croissant des $S_2(e_i)$ dans un tableau U

Groupement

(0) $i := |E| \rightarrow (1)$

(1) soient e_1, e_m les deux premiers éléments de U
 $U := U \setminus \{e_1, e_m\}$
 si $S_2(e_1) = \infty \rightarrow (4)$
sinon $\rightarrow (2)$

(2) $i := i+1$

e_1 et e_m créent la classe e_i
 - détermination de $P_\epsilon^2(e_i)$
 - calcul de $S_2(e_i)$
 $\rightarrow (3)$

(3) $U = \emptyset \rightarrow (4)$
 sinon $U := U \cup \{e_i\}$
 $\rightarrow (1)$

(4) fin.

Cet algorithme se traduit sur notre exemple (fig. 3.6 et 3.7) ainsi:

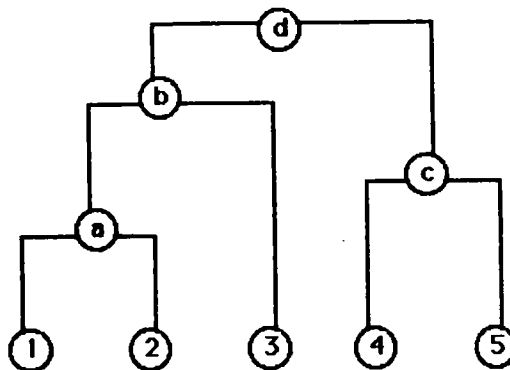


Figure 3.11: Arbre binaire de la structure pluvieuse de la figure 3.7

Si l'on crée un écho qui réunit les deux échos les plus proches, on arrive à un écho a (fig. 3.7) qui contient les échos 1 et 2. Nous appelons l'écho a un écho imaginaire car il n'existe pas réellement. Mais pour la comparaison des figures 3.6 et 3.7, la définition de l'écho a est raisonnable parce que les échos 1 et 2 sont en réalité le produit de la séparation de l'écho 2 de l'image précédente, et ils se trouvent alors dans une même zone de comportement.

Par cette technique, on définit une suite d'échos imaginaires qui sont liés par une structure arborescente. C'est-à-dire qu'on arrive finalement à une hiérarchie d'échos généralisés qu'on peut complètement représenter par un arbre binaire (fig. 3.11).

3.3.3.3. Propriétés mathématiques liés à cette méthode

Notre méthode d'agrégation crée un arbre binaire (fig. 3.12), qui en même temps forme une hiérarchie.

Dans ce paragraphe, on utilisera les notations :

$E = \{x_1, \dots, x_n\}$ pour les échos de base,
 $\bar{E} = \{x_{n+1}, \dots, x_{2n-1}\}$ pour l'ensemble des échos imaginaires.

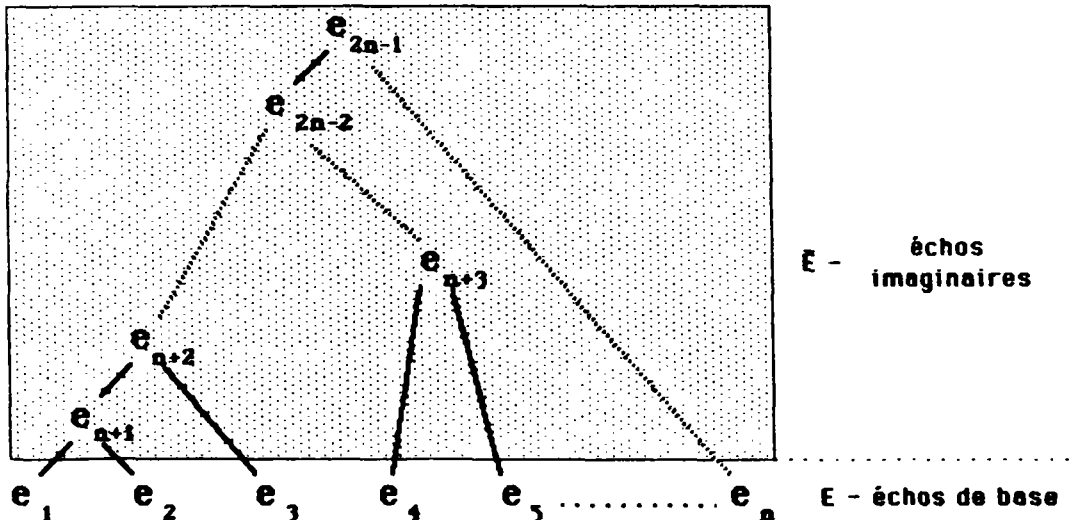


Figure 3.12: La hiérarchie des échos

Constatons d'abord que notre arbre binaire est une hiérarchie indicée. Pour cela, il faut remplir la définition suivante :

Soit H un sous-ensemble de $\mathcal{P}(E)$ tel que :

$$1) \forall x \in E : \{x\} \in H \text{ et } E \in H$$

$$2) \forall a, b \in H, a \cap b \neq \emptyset \rightarrow a \subset b \text{ ou } b \subset a$$

$$3) \exists h : H \rightarrow \mathbb{R}^+ :$$

$$\forall x \in E : h(\{x\}) = 0$$

$$\forall a, b \in H, a \subset b : h(a) \leq h(b)$$

alors, on appelle H une hiérarchie indicée.

Avec les définitions connues de E et de \bar{E} et en construisant h telle que :

$$h(x_i) = \begin{cases} 0, & i \leq n \\ i-n, & i > n \end{cases}$$

on vérifie immédiatement que ces conditions sont remplies pour que $H := E \cup \bar{E}$ soit une hiérarchie indicée.

Remarquons par curiosité que cette structure est à rapprocher des ensembles flous, car l'indice h fait partie des "k-clustering functions" de Hubert (1977) pour $k = 1$. Il remplit la condition nécessaire de :

$$\forall x_i, x_j \in H: h(x_i \cup x_j) = \max \{h(x_i), h(x_j)\}, \text{ si } x_i \cap x_j \neq \emptyset$$

parce que, si $x_i \cap x_j \neq \emptyset \Rightarrow x_i \cup x_j = x_i$ ou $x_i \cup x_j = x_j$

Emptoz (1983) montre que cette propriété est équivalent à la condition pour les mesures de possibilité, qui, eux, détermine des ensembles flous.

3.4. Le couplage hiérarchique (3ème étape)

La première et la deuxième étape travaillant sur une seule image, il n'est pas possible de reconnaître un développement dans le temps des structures pluvieuses. L'utilisation de deux images est donc indispensable pour repérer ce développement des structures. La formalisation fournie par la reconnaissance des formes est donc très utile: c'est l'étape dite de couplage.

3.4.1. Classification et couplage

Ce qui s'appelle classification en reconnaissance des formes est normalement une procédure de regroupement d'éléments en classes dont les représentants "typiques" (les prototypes) ou des descriptions typiques sont connus au préalable. Les structures élémentaires sont alors comparées aux prototypes ou aux descriptions et classées en conséquence.

Connaissant le nombre de classes et leurs caractéristiques, on peut déterminer à priori les mesures typiques qui distinguent une classe d'une autre. Par conséquent on définit les règles de décision pour la classification par l'analyse des classes et leurs propriétés.

Par exemple, il y a deux ensembles (fig. 3.13), des lettres et des seaux marqués par des lettres correspondantes (fig. 3.14), l'objectif est de placer les lettres dans le bon seau.

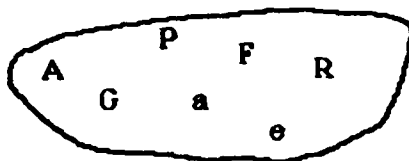


Figure 3.13: L'état au début

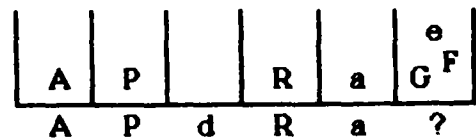


Figure 3.14: L'état final

Le problème de classification des échos de pluie d'une image est différent, car les prototypes des classes sont les échos donnés par l'image précédente; ils ne sont pas d'un niveau d'abstraction supérieur comme dans la classification "classique". Ainsi l'identification des échos présente trois différences importantes avec la classification "classique":

- les classes évoluent d'une image à l'autre (les étapes 1 et 2 sont effectuées en temps réel et servent à la définition des représentants des classes),
- chaque classe, représentée par un prototype, ne doit comprendre qu'un seul élément (d'où l'emploi du terme "identification") et
- la définition des classes n'est pas définitive à cause de réunions ou séparations possibles entre les échos (il peut y avoir regroupement physique de deux cellules de pluie dans le temps; il faut donc pouvoir modifier le prototype).

On pourrait comparer cette situation avec des seaux qui sont étiquetés en temps réel par les lettres d'un ensemble A (fig. 3.15) pour être utilisés en classification par un ensemble B. Evidemment il se pose des problèmes, montrés en figure 3.16.

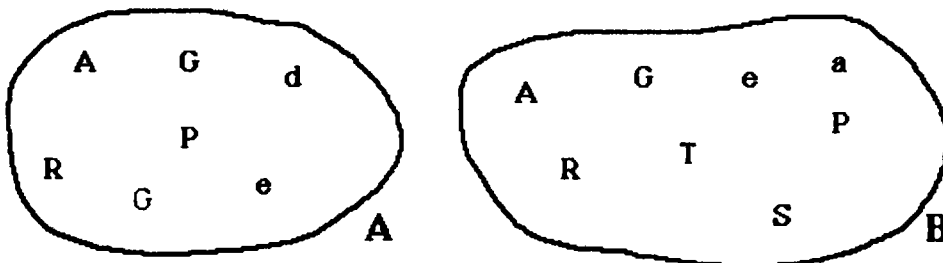


Figure 3.15: Les ensembles A et B

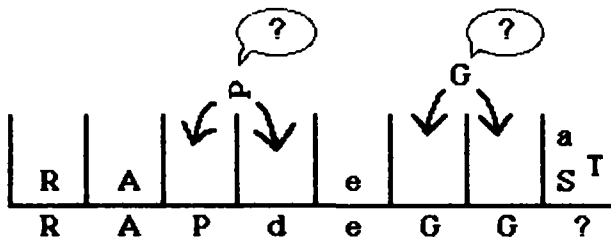


Figure 3.16: Le cas indéterminé

Pour surmonter les indéterminations, on introduit des contraintes (des règles de ressemblance en fait) pour mieux distinguer les classes, par exemple en marquant haut et bas de chaque lettre, en distinguant entre des lettres grasses et normales, ... Cela résoud le problème des lettres (fig. 3.17) et de la même manière on peut essayer de définir des contraintes pour les échos.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|----------------|
| | | | | | | | a |
| R | A | | d | e | G | | S ^T |
| R | A | P | d | e | G | G | ? |

Figure 3.17: La solution pour les lettres

Cependant on introduit aussi des contraintes supplémentaires comme la vitesse maximale possible, le maximum du changement de taille, le mouvement d'autres échos de la même région et la connaissance des prévisions précédentes (voir chap. 3.5). Ce processus qui concerne les classes et les éléments qui sont en réalité des objets du même genre s'appelle couplage; ici il s'agit même d'un couplage sous contraintes à cause des conditions supplémentaires à respecter. En anglais le couplage est désigné par le terme "matching".

3.4.2. Vers une technique de couplage hiérarchique

Parce que l'évolution future des échos n'est pas connue auparavant, il faut envisager plusieurs possibilités de couplage. Nous proposons pour cette raison plusieurs échos d'un même arbre comme partenaires de couplage éventuels d'un certain écho sur l'image suivante.

Dans notre exemple des figures 3.6 et 3.7, ce sont les échos 1, 2, a et c de l'image à 12h45 qui sont proposés comme candidats d'identification pour l'écho a de l'image à 13 h. Le processus de couplage décide alors du partenaire le plus adapté en fonction :

- du mouvement antérieur de l'écho,
- de la direction et de la vitesse du vent,
- de la taille des échos,
- de la distribution d'intensité des échos,
- de la forme des échos (élongation et angle de l'axe principal d'inertie) et,
- d'une comparaison entre les autres couplages.

Le choix de l'écho le plus adapté à un couplage détermine un vecteur de déplacement de cet écho. Les autres caractéristiques de l'écho couplé (par exemple indice de croissance, le nombre de couplages précédents) sont ensuite calculées ou actualisées. Pour les échos imaginaires, comme l'écho a par exemple, il faut assurer pour la suite un couplage fiable même avec une image ultérieure encore changée. Pour cela on transmet les attributs d'histoire de l'écho couplé (a) vers le bas dans l'arbre (fig. 3.18) (aux échos 1 et 2) et vers le haut (aux échos b et d) (remarque : en ce qui concerne l'écho d, on tient compte des autres couplages des échos plus bas que d, ceux des échos 4 et 5). Par pondération selon les masses de b et c, on obtient alors déjà une idée du comportement futur de la structure globale.

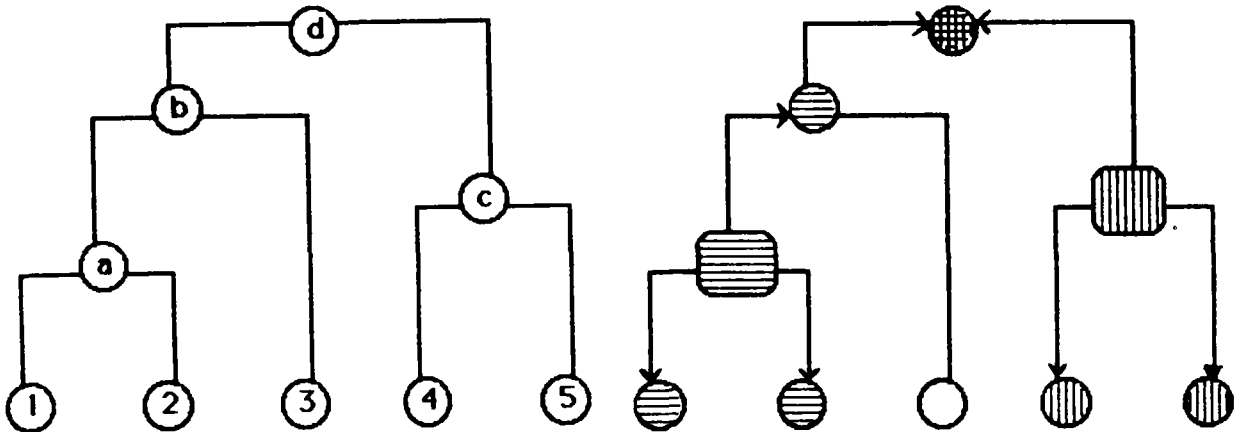


Figure 3.18: Le transfert des attributs historiques

Pour l'application de cette technique, nous avons choisi de n'utiliser que les échos imaginaires les plus importants formés par les échos de base les plus proches. On travaille alors avec des partitions (sous-ensembles de la hiérarchie), ce qui revient à négliger une grande partie des informations qui ne sont pas très importantes.

3.4.3. Mécanismes de contrôle

Après une décision comme le couplage hiérarchique, il faut vérifier par d'autres moyens si cette décision est la bonne. Ce contrôle se base sur quatre points qui sont liés entre eux :

- le rejet d'accouplements stupides,
- une réflexion sur les paramètres relativement invariants
- le rejet d'accouplement provoquant des variations trop brutales des caractéristiques du mouvement général ou par écho
- le calcul des paramètres caractérisant l'évènement

Premièrement, il faut "interdire" au système d'utiliser des couples incohérents. Deuxièmement, il faut tirer des conclusions de l'histoire des échos retrouvés et des couplages précédents. Et troisièmement, il faut trouver la meilleure façon de représenter la situation actuelle.

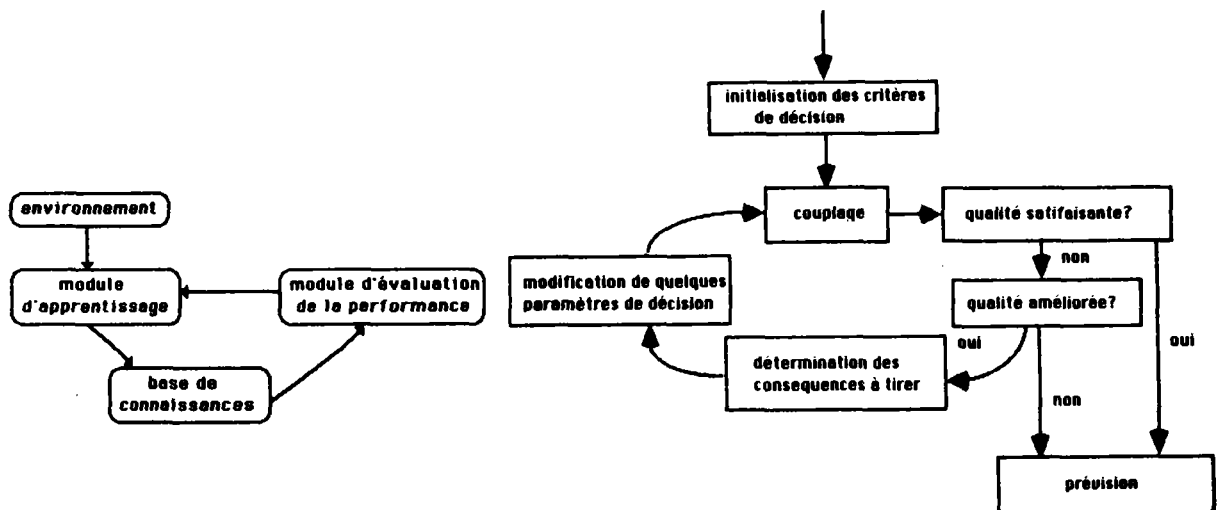


Figure 3.19: Cycle d'apprentissage

Figure 3.20: Cycle de contrôle

Ce mécanisme, pour lequel il y a beaucoup d'exemples classiques en reconnaissance des formes et intelligence artificielle, est à rapprocher de l'apprentissage, car un modèle simple d'apprentissage se constitue de modules équivalents (cf. figures 3.19 (d'après Lannuzel, 1987) et 3.20). Sur la base d'une connaissance historique et d'une heuristique dont on s'est muni, on analyse des informations. Cette évaluation a comme conséquence la mise à jour de la base des connaissances historiques, éventuellement suivie d'une autre analyse.

3.4.3.1. Exclusion des couples stupides

Pour contrôler le couplage, il faut étudier la validité des valeurs et des directions d'échos calculées, et il faut appliquer certaines règles heuristiques qui écartent des accouplements "stupides"; il s'agit alors d'établir des règles négatives comme les décrivent Kibler/Morris (1981) utilisées en l'intelligence artificielle. Les auteurs cités donnent l'exemple suivant tiré du "monde des blocs" :

"In the blocks world, four negative heuristics surprised us by eliminating nearly all search. Informally, they are:

1. *Don't add to a pile containing a block that needs to be moved.*
2. *Don't add to a pile containing a block that requires adding another block to it (unless you are presently achieving that goal).*
3. *Don't move a block off an irrelevant pile.*
4. *Don't move a block onto an irrelevant pile.*

... We say that a plan is stupid if it contains a (proper) subplan that solves the problem. A plan that is not stupid need not be optimal. For example, suppose the initial state consists of four blocks, with b and d on the floor, and c on d (fig. 3.21). Let the goal be d on b and a on c, as pictured below (fig. 3.22).

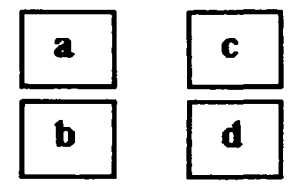


Figure 3.21

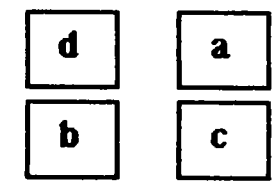
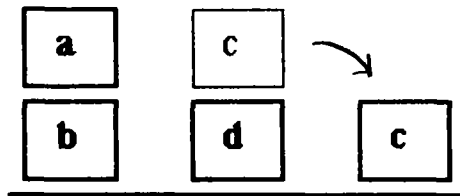
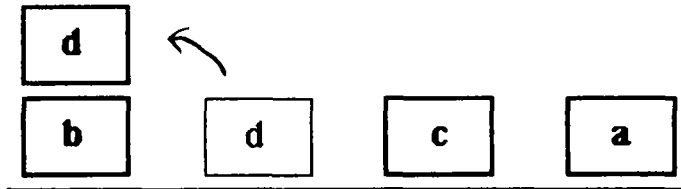


Figure 3.22

A non-optimal plan to solve this problem is: c to floor (fig. 3.23); a to floor; d to b (fig. 3.24); a to c. This plan is not stupid because no subsequence of the plan will solve the problem. Each operation of the plan contributes to the solution. The plan can be improved by omitting the second operation and interchanging the last two operations. In our view this goes beyond plan simplification."



Figures 3.23 (ci-dessus) et 3.24 (ci-dessous)



Une action stupide écartée par cette réflexion, c'est par exemple de placer le bloc a sur le bloc d dans la figure 3.23, parce que elle nécessite ensuite une autre action concernant ce bloc a pour dégager le bloc d et l'utiliser comme il montre la figure 3.24.

Evidemment, les réflexions au niveau de la prévision du mouvement sont plus compliquées à cause de la complexité bien supérieure du problème. Donc le nombre des règles négatives est plus grand. Nous pouvons travailler avec les règles suivantes :

- Les échos à identifier ne se trouvent pas à l'extérieur d'une distance maximale (p.ex. qui est équivalent à 100 km/h).
- Les échos déjà identifiés dans le passé ne changent pas leurs directions générales (→ information historique).
- Les échos fixes ne doivent pas être utilisés pour le calcul du vecteur moyen.
- Les trajectoires de deux échos ne se croisent pas.
- Les écarts des déplacements individuels par rapport au déplacement général ne dépassent pas une valeur limite.
- Sans un minimum d'information, une prévision n'est pas possible.

Ces règles ci-dessus aident à l'estimation du déplacement, parce qu'elles écartent déjà au début toute possibilité de décisions non logiques. Une sélection plus fine peut se faire par la suite en adaptant les paramètres de choix à la situation météorologique.

3.4.3.2. Paramètres invariants

D'autre part, le contrôle se base beaucoup sur la perception d'un problème et son interprétation.

Généralement, on considère pour une prévision de pluie qu'il y a quelques paramètres qui sont invariants, notamment :

- la taille des échos,
- la forme des échos,
- vitesse et direction du mouvement.

Cette supposition est d'autant plus justifiée que la situation météorologique est d'un caractère stable. Selon la stabilité atmosphérique, la prévision produite par des méthodes reposant sur ce principe est alors plus ou moins significative.

Thierry Denoeux montre dans sa thèse qui va paraître en 1988, qu'on peut déduire des caractéristiques purement structurelles d'une image une tendance de stabilité atmosphérique. Il associe à une grande taille moyenne des échos un caractère plutôt peu convectif (= peu évolutif au niveau de l'écho), à un nombre élevé d'échos un caractère plutôt convectif, etc. Parce que ces résultats préliminaires décrivent un état tendanciel, on ne peut les utiliser qu'en prenant des précautions. Il serait cependant dommage d'ignorer de telles informations météorologiques.

3.4.3.3. Une approche itérative du contrôle

Parce qu'il n'est pas évident de construire une logique de décision à partir de telles informations probabilistes, nous proposons plutôt une approche itérative en six étapes. Cette approche va tenter de faire une distinction entre les paramètres caractérisant une image et ceux caractérisant un événement ou une suite d'images.

Cette technique est proche d'un processus de généralisation et spécialisation en intelligence artificielle, parce qu'il essaye "d'apprendre" quels sont les paramètres et les propriétés importants. Pour illustrer un tel processus, prenons l'exemple de la recherche d'un numéro de téléphone dans un annuaire : on cherche le numéro de Georges Dupont, 40 avenue de Gaulle. Commenant par une recherche utilisant nom et prénom il y a trois possibilités:

1. il n'y a qu'un seul Dupont dans l'annuaire,
2. il y a plusieurs Dupont dans l'annuaire,
3. il y a plusieurs Georges Dupont, mais un seul à l'adresse indiquée.

Dans le premier cas (fig.3.25a), on va faire une prochaine recherche seulement par nom, dans le deuxième cas (fig. 3.25b) on a trouvé la bonne manière et dans le troisième cas (fig. 3.25c), on cherche une autre fois en utilisant dès le début toute l'information.

DUPIN, Charles 56, rue Grenelle
DUPONT, Georges 40, Avenue de Gaulle
 DUORTE, Albert 34, Bd Haussmann

DUPIN, Charles 56, rue Grenelle
DUPONT, Georges 40, Avenue de Gaulle
DUPONT, Georgette 2, rue du Midi
 DUORTE, Albert 34, Bd Haussmann

DUPIN, Charles 56, rue Grenelle
DUPONT, Georges 40, Avenue de Gaulle
DUPONT, Georges 39, Avenue Leclerc
 DUPONT, Georgette 2, rue du Midi
 DUORTE, Albert 34, Bd Haussmann

Figure 3.25a-c: M. Dupont dans l'annuaire

Le premier cas est une généralisation et le troisième une spécialisation de notre manière de recherche au départ. Nous adaptons une telle technique au contrôle du couplage, cela donne :

(1) on reprend au début des seuils de décision moyens pour la variabilité de formes, et de direction et vitesse du déplacement qui ont été utilisés pour la dernière image. Si on ne dispose pas d'une image précédente, on utilise des seuils moyens, météorologiquement raisonnables.

(2) selon un critère heuristique on attribue une note de validité au couplage. (indicateurs possibles : pourcentage des échos identifiés, pourcentage de surface des échos identifiés, écart-types des vecteurs individuels du mouvement général,...)

(3) (généralisation) : si la note de validité indique que les critères étaient trop exigeants, on diminue l'exigence.

(4) (spécialisation) : si la note de validité indique qu'il y avait trop d'ambiguïtés dans le couplage, on renforce les critères.

(5) (itération) : si on change les critères par (3) ou (4) et qu'on n'a pas encore dépassé un nombre maximal de boucles, on réalise un nouveau couplage et on retourne à l'étape (2).

(6) on accepte le dernier couplage et procède à la prévision.

Par cette technique, on s'approche itérativement de la description de la situation météorologique en termes de variabilité des caractéristiques des échos.

3.4.3.4. Caractérisation de l'évènement

Les réflexions sur les paramètres invariants à une certaine échéance (et donc éventuellement capable de décrire un phénomène) ainsi que le problème de validité des paramètres jouent en rôle important pour le suivi historique d'un événement. Il faut notamment choisir des informations qui seront encore utilisables pour le couplage suivant et il ne faut pas les interpréter dans un contexte trop vaste ou trop étroit.

Pour caractériser un événement, nous utilisons les informations :

- du mouvement moyen des 5 dernières images,
- du mouvement individuel de la dernière image,
- du dernier facteur de croissance de chaque écho (taille et intensité),
- du nombre des bonnes identifications de chaque écho.

Les informations sur le mouvement et son écart servent à déterminer la région de recherche pour le couplage. Le nombre de bons couplages d'un écho permet de diminuer successivement la plage de variation qui doit être attribuée à un écho sans passé.

Les informations sur la croissance des échos vont servir comme descripteurs de la situation météorologique et peuvent contribuer à une prévision de l'évolution.

Chacune de ces informations dispose d'une variabilité plus ou moins grande, surtout en début d'évènement, quand elles représentent un petit échantillon d'images. En élargissant cet échantillon (après cinq à dix images), la connaissance de ces valeurs est beaucoup plus fiable (et les valeurs plus stables).

3.5. Prévision et extrapolation (4ème étape)

Pour atteindre la prévision nous allons développer deux outils complémentaires par des moyens très simples qui doivent tenir compte des différentes situations météorologiques possibles. Or, les deux situations météorologiques les plus différentes dans notre région sont caractérisées par un vent considérable et peu d'évolution (advection, "front") ou par une forte évolution d'échos et peu de déplacement (convection). En conséquence, on va proposer une technique de prévision pour chacun de ces cas extrêmes. Les techniques de prévision pour le mouvement et la croissance des échos seront toutes deux des procédures linéaires. Ceci implique notamment une forte simplification du processus de croissance et décroissance qui va être discutée par la suite.

Dès qu'on a bien déterminé l'évolution présente (mouvement et croissance), une extrapolation de cette évolution donne une idée de ce qui va se passer. Cependant l'extrapolation de l'évolution comme méthode de prévision est cause d'erreurs pour diverses raisons :

- certaines recherches historiques (Wilson, 1966) ont montré que le mouvement réel de grands échos est dans l'hémisphère nord plus à gauche que le mouvement extrapolé (fig. 3.26).

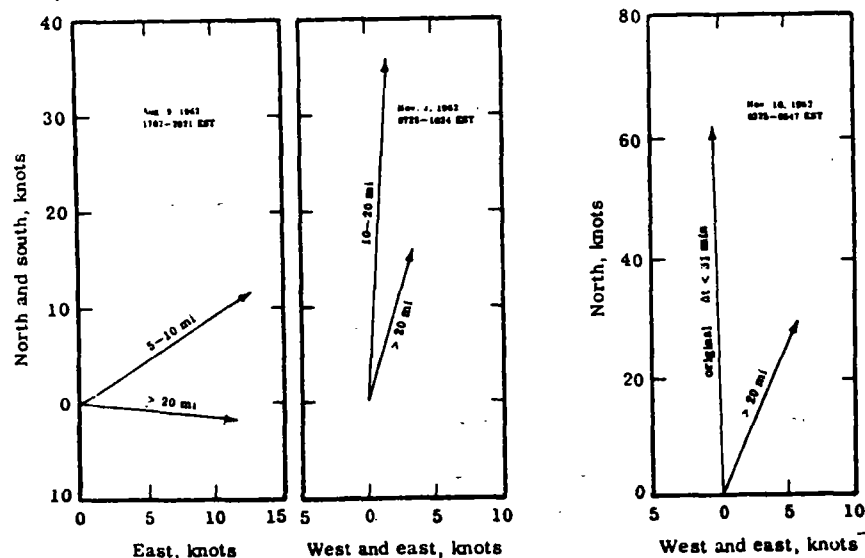


Figure 3.26: Le mouvement des échos selon leur taille

- il y a une baisse de performance de la prévision en fonction de l'échéance (fig. 3.27): celle-ci est plus importante en présence de convection.

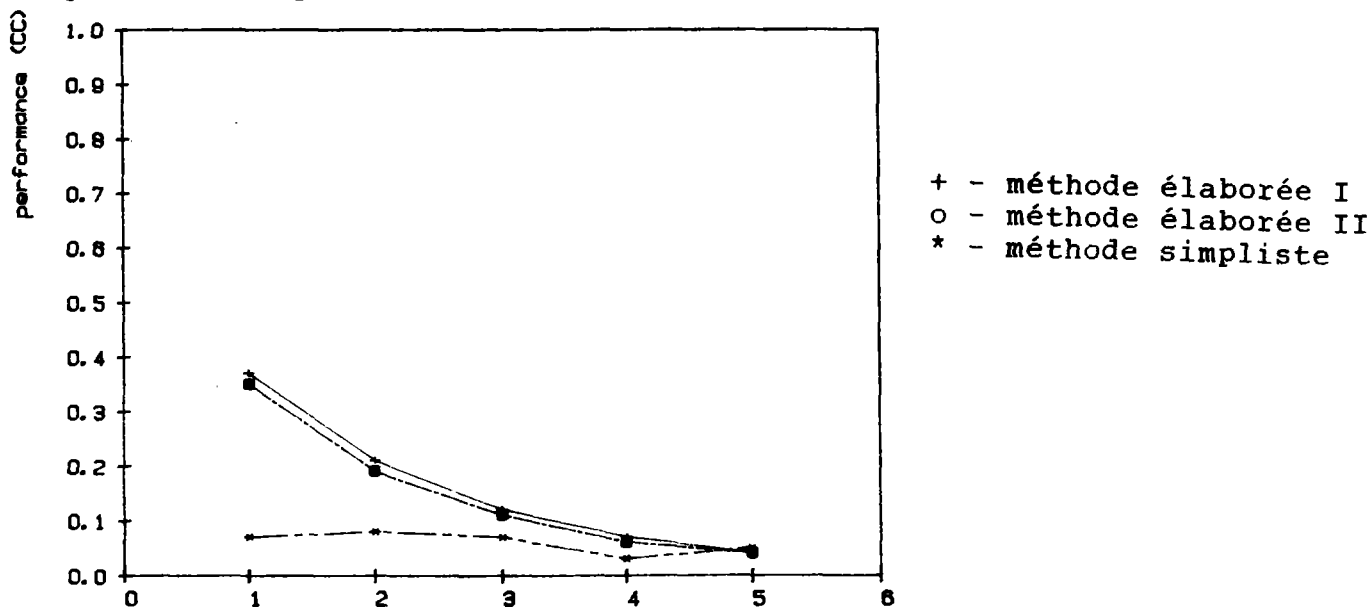


Figure 3.27: Performance (CC) le 13 juillet 1984

- la fiabilité de l'estimation du mouvement dépend de la précision avec laquelle on a pu obtenir les vecteurs de déplacement et les couplages des échos (indicateurs : pourcentage en surface des échos couplés, écart-types des vecteurs individuels du mouvement général, pourcentage des échos identifiés,...).

- aucun modèle simple de croissance et décroissance (le développement) d'échos n'a jusqu'à présent donné satisfaction aux utilisateurs. Car, ce processus étant fortement aléatoire, sa modélisation statistique n'est pas du tout évidente.

3.5.1. Le calcul du mouvement

- le cas de la translation simple

Si on suppose un déplacement linéaire des échos, on a plusieurs choix pour le vecteur de prévision v_t :

(1) on prend le vecteur de déplacement calculé v'_t

$$v_t = v'_t$$

(2) on prend la moyenne entre le déplacement calculé et la prévision précédente

$$v_t = \frac{v'_t + v_{t-1}}{2}$$

(3) on prend une formule qui tient aussi compte de l'influence temporelle (Blackmer, 1973)

$$v_t = v'_t * \exp\left(\frac{\Delta t}{t_0}\right) + (1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{t_0}\right)) v_{t-1}$$

(4) on corrige par l'erreur de la prévision précédente

$$v_t = v'_t - e_{t-1}$$

(5) on prend la moyenne des cinq derniers vecteurs calculés (Bjerkaas/Forsyth, 1980) :

$$v_t = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v'_{t+1-i}$$

où sont

- t - le temps actuel
- t-1 - le temps précédent
- Δt - différence entre t et t-1
- t_0 - constante
- v - vecteur de prévision
- v' - vecteur du mouvement général calculé

La solution (1) ne semble pas être très réaliste car généralement le mouvement est un facteur relativement stable: le vecteur de déplacement n'est donc pas indépendant des vecteurs précédents.

La solution (2) est en fait plus complexe que sa formule ne le laisse croire. La dépendance envers les mouvements antérieurs est plus évidente si on regarde plusieurs prévisions (n prévisions) déjà obtenues:

$$v_t = \left(\frac{1}{2}\right)^{n+1} v'_{t-n} + \sum_{i=0}^n \left(\frac{1}{2}\right)^{i+1} v'_{t-i}$$

Cette formule de dépendance est beaucoup plus simple que celle de Blackmer (solution (3)) mais dans la pondération elle ne tient pas compte des pas de temps différents entre les mesures. La solution (3) par contre paraît trop floue et trop difficile à utiliser car elle nécessite une réflexion sur la valeur de t_0 .

La solution (4) s'applique déjà avec succès aux modèles dans d'autres domaines où l'on peut bien évaluer l'erreur. Parce que ce modèle ne donne pas (encore?) la possibilité d'une quantification relativement sûre, cette solution ne peut pas être utilisée pour l'instant.

Enfin, la formule (5) utilise la moyenne des cinq derniers calculs de déplacement. Ceci permet particulièrement dans le cas de très courts pas de temps (< 10 minutes) d'éviter une extrapolation fautive à cause de petites erreurs dans le calcul du mouvement. Pour un pas de temps d'au moins 15 minutes, cette solution nous semble trop grossière.

Donc, pour le pas de temps d'au moins 15 minutes, c'est la solution (2) qui a été retenue: elle conserve bien une partie de l'histoire des déplacements mais elle permet d'intégrer facilement de nouvelles informations. Néanmoins pour des données enregistrées toutes les cinq minutes, nous proposerons plutôt la solution (5) qui permet de réduire les imprécisions dues à des erreurs par l'extrapolation des petits déplacements passés.

3.5.2. L'approche linéaire du développement d'échos

Nous choisirons dans ce chapitre une technique d'extrapolation de taille d'échos parmi celles déjà mises en oeuvre par d'autres auteurs sans toutefois chercher une amélioration. Nous discuterons ensuite au chapitre 4.1 les limites de prise en compte de la réalité de l'évolution de cellules pluvieuses, dont nombre d'auteurs ont déjà montré les caractéristiques non-linéaires (cf. par exemple Lopez et al., 1984 ; Pani/Haragan, 1985 et figure 3.28).

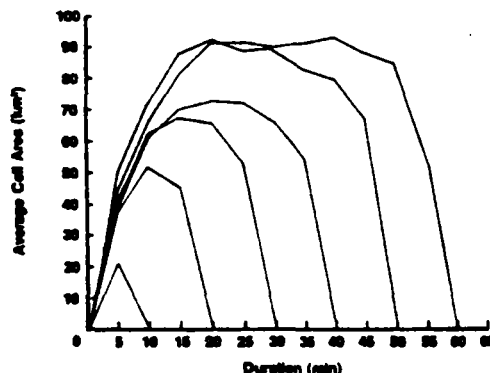


Figure 3.28: Le cycle de vie de cellules, d'après Lopez

Généralement, les échos peuvent évoluer de trois façons différentes :

- croître
- décroître
- rester inchangés.

Comment découvre-t-on cette phase de développement d'un écho ? Les paramètres les plus visibles sont la taille et l'intensité moyenne. Par l'extrapolation de l'évolution de ces paramètres, on arrive à faire une prévision du développement d'un écho. Tsonis/Austin (1981) étaient les premiers à analyser le gain d'une telle méthode automatique pour la prévision. Dans leur étude, ils ont utilisé des cellules d'un cycle de vie supérieur à 100 minutes. Leur analyse des méthodes d'extrapolation concluait en faveur d'une extrapolation linéaire simple du style :

$$p_{t+\Delta t} = m_t + a \cdot m_t$$

p étant le paramètre à estimer (masse ou taille), m le paramètre mesuré et a le facteur de développement.

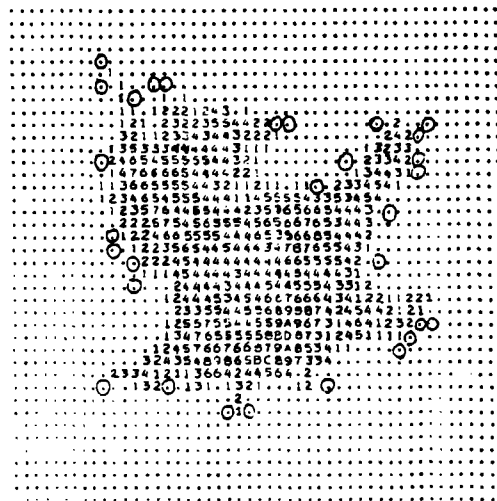


Figure 3.29: La manière d'élargissement d'échos de Tsonis/Austin(⊙)

La méthode de Brunkow (1980) fonctionne essentiellement de la même manière. Il ajoute une limite maximale de croissance d'un écho, ce qui nous semble très raisonnable.

La manière dont on change l'intensité d'un écho est évidente : on applique le facteur de changement à chaque pixel de l'écho à modifier.

Pour le changement de la surface d'un écho, Tsonis/Austin proposent d'ajouter des points autour de l'écho d'une manière aléatoire (fig. 3.29). L'approche de Brunkow est plus géométrique : il entoure l'écho du plus petit rectangle possible et gonfle ou dégonfle ce rectangle qui contient l'écho selon son extrapolation (fig. 3.30a-c).

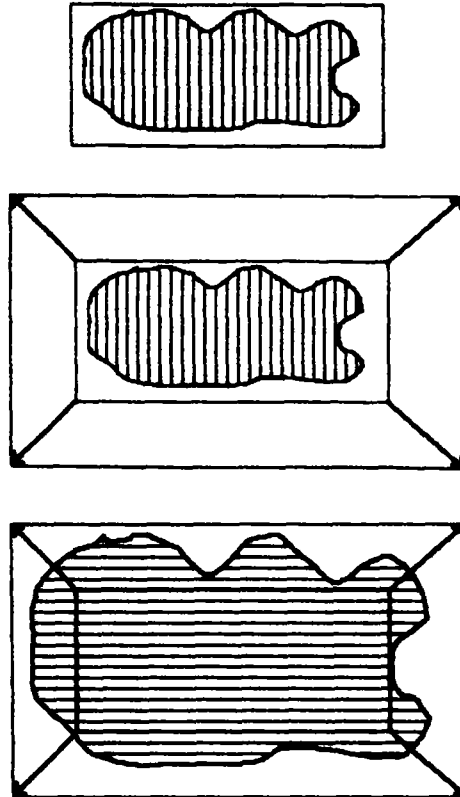


Figure 3.30a-c: La technique de Brunkow

Nous avons essayé une approche dérivée de celle de Brunkow mais qui s'inspire également des travaux de Tsonis/Austin. Prenons comme exemple le cas d'un écho qui doit être gonflé de 8%; autrement dit, la surface de l'écho prévu doit atteindre 108 % de celle de l'écho initial. Si on l'entoure du rectangle décrit, on arrive alors à une surface rectangulaire de l'écho (fig. 3.31), de 10 x 10 pixels. Pour élargir chaque côté, il faut normalement les multiplier par

$$\sqrt{1.08} \approx 1.04, \text{ qui est le facteur d'élargissement pour chaque côté}$$

L'erreur d'arrondi introduit donc un "statu quo". Si par contre en utilisant la même formule, on retient la différence entre la valeur exacte et la valeur arrondie du premier côté, on peut l'ajouter au calcul du deuxième. On s'approche de cette façon de la vraie valeur: on arrive à une surface rectangulaire de 110 pixels, qui est plus proche de la valeur exacte de 108 que ne l'est 100. On procède de la même manière à l'intérieur du rectangle pour le déplacement (ou la doublure même) de pixels (fig. 3.31).

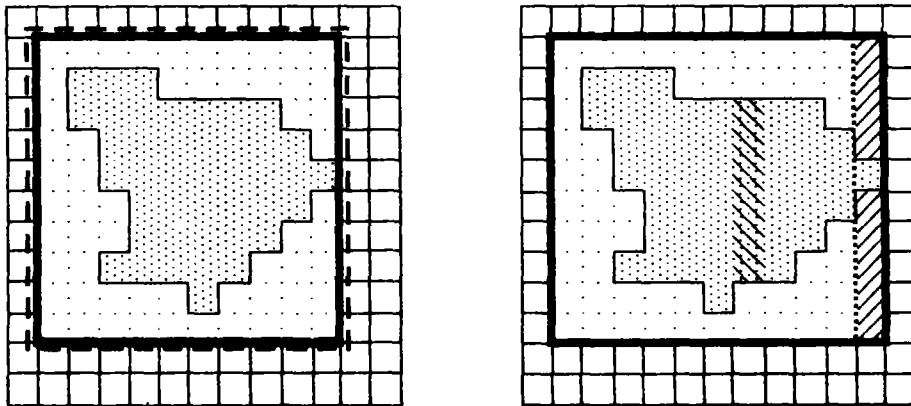


Figure 3.31: Gonflage du rectangle avec l'écho inscrit

Pour la décroissance d'un écho, on peut procéder de la même manière, ou on peut simplement réduire la masse en réduisant la valeur de chaque pixel par le facteur calculé. Ceci provoque une réduction en taille moins bien contrôlée, mais le rapport des masses est exactement modifié.

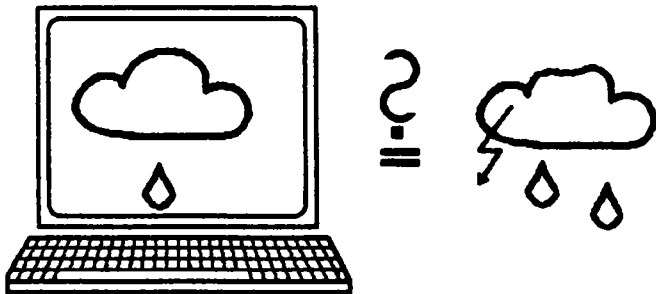
3.6. Conclusion

Les outils théoriques de la reconnaissance des formes offrent un cadre dans lequel peuvent se glisser nombre de caractéristiques d'une méthode de prévision radar.

Toutefois, il nous paraît indispensable d'accompagner cette démarche théorique d'une démarche orientée vers la connaissance des caractéristiques du problème posé. Ainsi, on s'oriente soit vers la sélection de paramètres des algorithmes, soit vers la prise de conscience des limites à priori de la nouvelle méthode de prévision qu'on veut concevoir.

CHAPITRE 4

FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA METHODE DE PREVISION



Après cette revue des outils méthodologiques, nous allons aborder une discussion sur les problèmes de prévision liés au phénomène et aux données étudiées pour évaluer la capacité des moyens classiques présentés dans le chapitre 3 à les prendre en compte. A chaque problème, il est nécessaire d'associer soit des modifications ou une paramétrisation de la méthode, soit des conséquences prévisibles sur la performance de la méthode qui ne les prend pas en compte.

Généralement ces problèmes peuvent être classés comme "dûs à la technique radar", "dûs aux objectifs" ou "dûs au phénomène naturel" (voir tableau 4.1).

4.1. Facteurs météorologiques à l'échelle du radar

4.1.1 Quelques rappels météorologiques

Plusieurs chercheurs ont tenté de classer les structures météorologiques selon leur taille, leur durée de vie et leur caractère (e.g. Browning, 1985 ; Austin/Houze, 1972).

Tandis que Browning caractérise précisément d'un point de vue météorologique les structures qui produisent la pluie, Austin/Houze se contentent d'une caractérisation par taille, durée de vie et hauteur d'eau (tableau 4.2.).

| structure météorologique | taille (en km ²) | durée de vie | intensité (mm/h) |
|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------|
| structure synoptique | > 10000 | jours | 0.5 - 1.0 |
| structure en large mésos-échelle | 1000 - 10000 | heures | 1.0 - 5 |
| structure en petite mésos-échelle | 100 - 400 | 1 heure | < 20 |
| microstructure | ≈ 10 | minutes | < 100 |

Tableau 4.2 : Classification de la pluie (d'après Austin et Houze, 1972)

| problème | niveau | méthode influencée | remarques |
|---------------------------------|------------------|----------------------|--|
| échos fixes | radar | toutes | partiellement soluble en utilisant des vecteurs individuels (ch.4.2.1) |
| influence du bord | radar | RF | la définition du bord de l'image modifie le calcul du centre de gravité d'un écho qui ne se trouve pas totalement à l'intérieur de l'image (4.2.3) |
| bande brillante ("bright band") | radar | toutes | niveau très intense de transformation de neige en pluie voir Smith (1986) et annexe 6 |
| influence de la distance | radar | toutes | selon l'angle d'élévation du rayon de radar, une diminution des intensités de pluie (4.2.2) |
| calibration | radar objectifs | toutes | relation variable entre Z (réflectivité de pluie) et R (intensité de pluie); cf. Andrieu (1986) |
| discrétisation en niveaux | radar objectifs | toutes sauf binaires | plusieurs possibilités selon les objectifs à atteindre; voir Browning et al. (1980) |
| pas de temps des mesures | radar objectifs | toutes | influence sur l'extrapolation (prévision) |
| choix des caractéristiques | objectifs | RF | voir chapitre 3.2 |
| temps calcul | objectifs | toutes | voir chapitre 4.3 |
| définition du vecteur moyen | objectifs | toutes | réflexion sur la validité des informations précédentes et présentes |
| mouvement inhomogène | objectifs nature | CC | voir 4.1.3 pour rec. des formes; et essais de chercheurs sur CC (cf. Blackmer, 1973; Harrold, 1976) |
| agrégations et séparations | nature | RF | défavorable à un bon couplage (4.2.4) |
| élargissement et diminution | nature | toutes | influence sur le couplage (RF) et prévision (toutes), (4.1.4) |

Tableau 4.1: Les problèmes qui gênent la prévision de pluie par radar (les chiffres renvoient aux chapitres de ce rapport)

On voit alors que les événements qui sont intéressants pour l'hydrologie urbaine sont caractérisés par des structures d'une taille inférieure à 10000 km². Il faut cependant remarquer que de telles structures comme des petites mésostructures peuvent se trouver à l'intérieur d'une large mésostructure ou d'une structure synoptique.

Pour la prévision de pluie, on a besoin de connaître la variation temporelle de ces structures.

A l'échelle d'observation du radar, il y a deux phénomènes dominants :

- le déplacement de cellules pluvieuses par le vent (advection),
- le changement de forme et d'intensité d'une cellule.

L'un de ces deux phénomènes est souvent dominant : si l'on a une forte advection, comme par exemple lors des tempêtes d'automne en Europe, le changement en forme et en intensité reste secondaire. L'inverse, le développement de pluie sans déplacement majeur est à observer dans les orages estivaux.

Dans la plupart des cas on rencontre cependant des situations entre ces deux extrêmes. Mais les méthodes de prévision courantes ne tiennent compte que de l'advection. On néglige alors une partie importante du processus pluvieux (cf. 4.1.2).

4.1.1.1. Le phénomène de l'advection

La modélisation de l'advection par la translation (le déplacement géométrique simple) a déjà fait l'objet de plusieurs études de prévision (cf. Wilson, 1966 ; Browning et al. 1980). Il y a des analogies dans plusieurs domaines proches (analyse d'images satellites) ou éloignées de la prévision de pluie (traitement d'images).

Cette translation est souvent liée au vent d'altitude entre 3000 m et 5500 m. Sous certaines conditions (connaissance de la structure à méso-échelle), on peut même déduire du vent actuel la translation à attendre, parce que ce mouvement est peu susceptible de subir de variations importantes à l'échelle de l'heure.

A la condition que le mouvement sur l'image soit uniforme, la méthode de corrélation croisée convient parfaitement à sa modélisation (Cf. Browning/Mason, 1980)

4.1.1.2. Caractérisation de la convection

La convection est un processus lié au mouvement vertical de masses d'air.

Quand il y a mouvement ascendant d'une particule atmosphérique, la baisse de pression d'air entraîne un refroidissement de l'air dans la particule. Deux cas sont alors possibles:

- soit la particule devient plus froide que son environnement; dans ce cas-là, elle va immédiatement redescendre, on parle d'une situation stable,
- soit la particule reste plus chaude que son environnement; elle va alors continuer à monter, la situation est instable.

Dans le deuxième cas, on peut observer le développement d'un nuage convectif lié à une montée d'air accentuée à son intérieur. L'importance (et le volume d'eau susceptible de tomber) de ce nuage est directement liée aux différences en températures et en pression entre les couches d'air ainsi qu'à la répartition de l'humidité dans ce nuage.

Pour une cellule convective de pluie, on a observé tout un cycle de vie (Triplet/Roche, 1977). Celui-ci est d'autant plus long que la cellule est grande. Ce cycle commence par les effets thermodynamiques décrits plus haut, ensuite, en cas de précipitations, il se crée un mouvement d'air descendant qui s'oppose à la tendance ascendante. Quand tout mouvement ascendant est ainsi détruit, le nuage est dissipé (fig. 4.1).

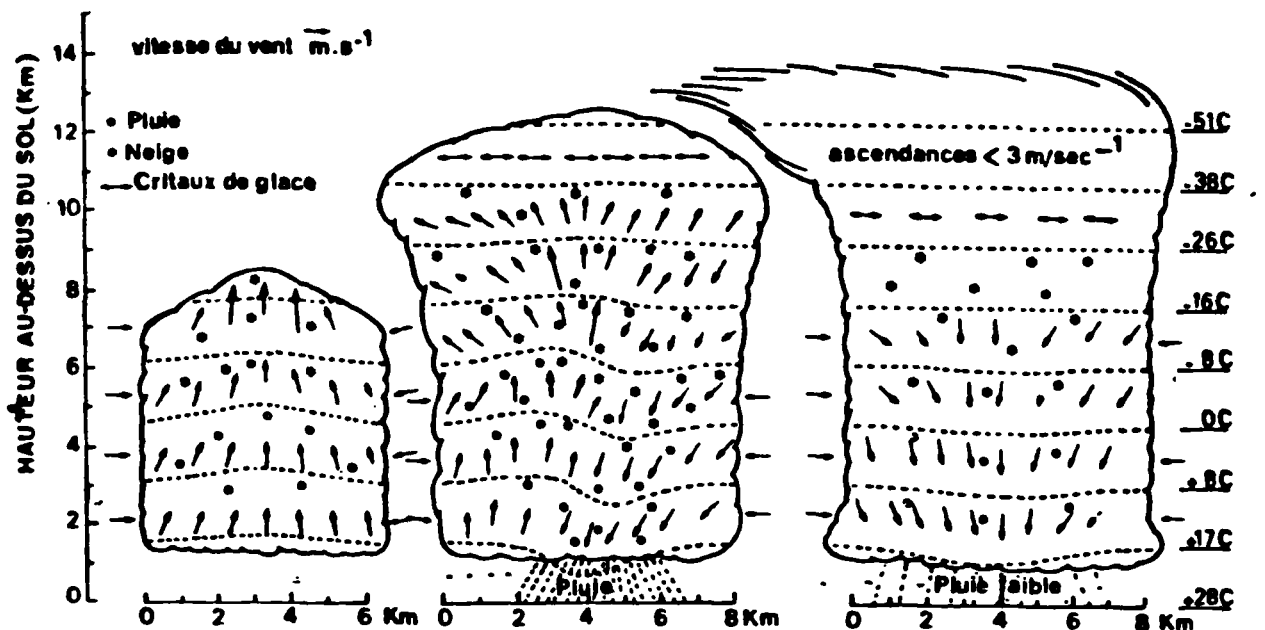


Figure 4.1 : Le processus de convection (schématique)

Une modélisation de ce processus à l'échelle microscopique est très complexe. La résolution des équations différentielles nécessitait encore en 1975 pour la simulation d'une journée d'un modèle en méso-échelle (1000 km²) sept heures de temps CPU pour un ordinateur CDC 7600 (Schilling, 1983). Le nombre de paramètres est important, et les incertitudes qui s'y rattachent, ont tendance de s'élargir mutuellement.

4.1.1.3. L'importance des structures convectives

Le danger des structures convectives est qu'elles ne sont ni facilement prévisible ni reconnaissables. Si l'on veut établir une prévision quantitative de la pluie, le risque d'une sous-estimation de crue, voir de ne pas prévoir une inondation, est alors important.

On est tenté de conclure qu'une situation advective est plus prévisible qu'une situation convective. Comme on l'a déjà constaté plus haut, ces deux situations n'existent normalement pas d'une manière "pure", il y a toujours les deux influences. Browning (1985) a même trouvé qu'il y a des fronts advectifs entièrement constitués de cellules convectives.

Ceci se trouve surtout dans les larges méso-structures et les structures synoptiques. Le radar permet dans ce cas-là de distinguer des zones de pluie intenses et moins intenses. De cette façon, on peut observer trois cas dangereux possibles :

- une agglomération de cellules convectives,
- une supercellule ou
- des "lignes de grains" (anglais : squall line).

* Une agglomération de cellules convectives (fig. 4.2) montre un comportement lié à la vie des cellules individuelles. On constate qu'il y a des parties de la structure en échelle moyenne qui s'accroissent et d'autres qui diminuent en taille et/ou en intensité. Cependant, ces effets individuels peuvent avoir peu d'influence sur le comportement de l'ensemble. On peut aussi constater des mouvements de cellules individuelles qui sont différents de ceux de la structure à l'échelle moyenne (cf. Denoeux, 1986a et Wilson, 1966). Ceci peut être encore plus important en présence d'une zone de naissance d'échos et d'une zone de dissipation : on a l'illusion d'une stationnarité de l'ensemble tandis que les cellules individuelles peuvent se déplacer à une vitesse considérable (Vasiloff/Brandes, 1984).

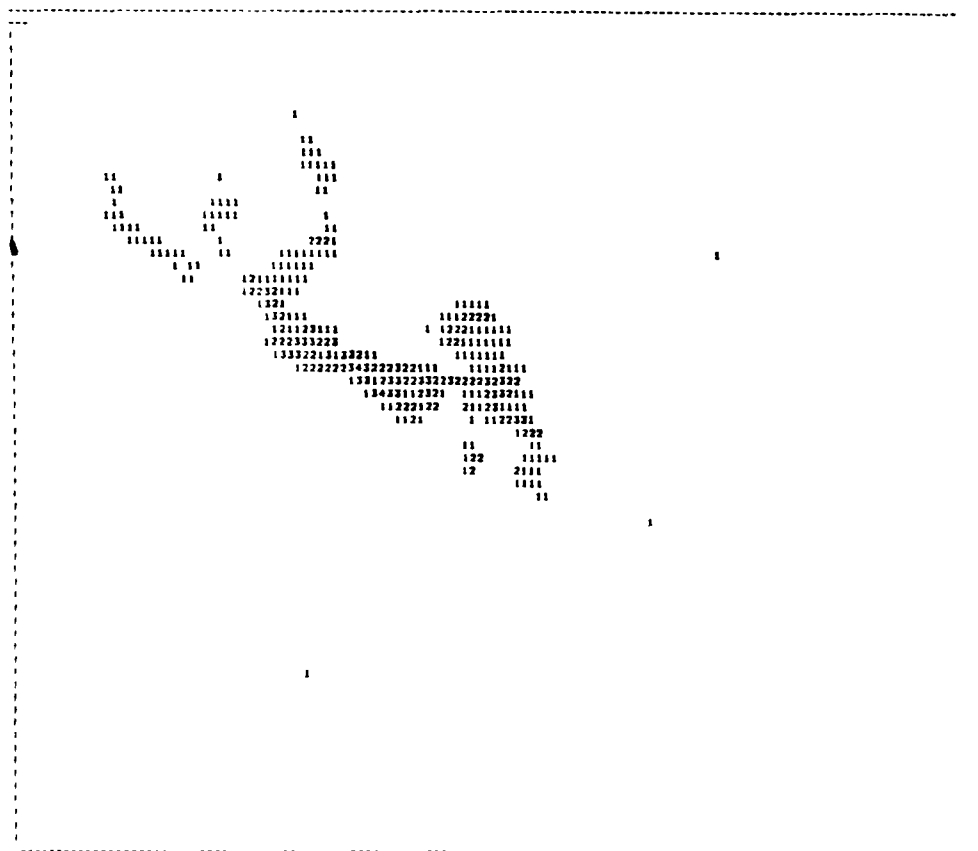


Figure 4.2: le 24/10/84; plusieurs cellules convectives

- * Une super-cellule est une cellule convective qui est plus grande qu'une cellule normale, autrement dit qui a trouvé des conditions très favorables à la formation d'une très grande cellule d'une durée de vie de plusieurs heures. Au contraire des cellules ordinaires, elle se déplace beaucoup plus lentement que le vent moyen, donnant lieu à des orages d'une importance exceptionnelle. La distinction entre la classe des multi-cellules et la classe des super-cellules peut n'être pas claire (Vasiloff/Brandes, 1984).
- * Les "cellules en ligne" (fig. 4.4), appelées "lignes de grain" (Denoëux, 1986a) sont associées à une ligne de convection dans un front froid (fig. 4.3). Elles ne sont pas très épaisses ni très larges (moins de 3 km en général), mais elles donnent lieu à une forte précipitation. De plus, Browning/Mason constatent que de telles lignes convectives voyagent souvent plus rapidement que le système en échelle synoptique. En arrivant à la frontière de la précipitation modérée, elles se dissipent: on a le même effet sur le suivi du mouvement qu'en cas d'agglomérations de cellules. Un exemple d'une telle ligne de grain est donné dans l'annexe 4.

De cette discussion, on peut retenir les conclusions suivantes :

- 1) à l'intérieur d'une structure de pluie de faible intensité à l'échelle moyenne, il se trouve généralement des éléments plus petits et plus intenses.
- 2) si une structure à l'échelle moyenne se déplace d'une certaine façon, cela n'est pas nécessairement le cas pour ses parties les plus intenses (et dangereuses).
- 3) de même, les événements frontaux peuvent inclure des effets convectifs qui ne peuvent pas être estimés par une simple translation du système frontal.

Nous arrivons alors avec le premier et le deuxième point à nous concentrer sur les éléments les plus intenses, et le troisième point encourage une utilisation d'un outil de modification de forme d'un écho comme celui présenté dans le chap. 3.5.2.

Toutes ces structures d'échos peuvent être modélisées par une approche d'échos imaginaires.

4.1.2. La prise en compte de la croissance et la diminution d'échos

Un développement de cellules de pluie en taille et en intensité s'observe surtout en situation convective, mais aussi dans certaines situations frontales, comme nous l'avons déjà vu au chapitre 4.1.1. (fig. 4.5 et 4.6). Il s'agit d'un changement qui peut être rapide et important. Pour le modéliser avec les échos radar, il y a trois approches de base:



Figures 4.5 et 4.6: le 10/9/84 à 11:15

le 10/9/84 à 11:45

(a) On utilise la connaissance du développement passé: en utilisant un facteur qui est calculé en fonction de la différence en taille, en somme d'intensité ou en inertie. Ce facteur s'applique plus tard à l'estimation de la croissance pour la prévision.

(b) On utilise la statistique en termes météorologiques: quand on identifie une situation comme "situation convective", on fait l'hypothèse qu'elle va évoluer à peu près comme les autres situations de ce type rencontrées dans le passé (Pani/Haragan, 1985). Alors, on peut essayer un ajustement des informations précédentes avec les courbes statistiques (durée, intensité, facteur de croissance) qui sont typiques de cette situation météorologique. Cela pose surtout des problèmes au niveau du choix de la courbe: premièrement, quelle est la courbe adéquate et deuxièmement quelle est sa plage d'incertitude (qui influe sur la qualité de la prévision).

(c) enfin, on peut avoir recours à la vision humaine: dans le processus d'identification on peut être aidé par un modèle simple de la vision humaine, c'est-à-dire d'un modèle des relations relatives entre les échos à l'intérieur d'une image. Cela peut être la distance et la direction de chaque écho par rapport aux échos les plus importants. Avec ce moyen, même les échos avec des gros changements peuvent être reconnus, en tenant compte de la connaissance des développements précédents.

Pour l'instant il y a quatre équipes qui ont déjà travaillé sur la croissance et la décroissance: le Meteorological Office en Angleterre (Sargent, 1986), le groupe de McGill à Montréal (Tsonis/Austin, 1981), le groupe à Champaign, Illinois (Huff et al., 1980), et l'équipe qui développe le radar NEXRAD (Walton/Johnson, 1986).

Les Anglais appliquent un facteur entre 0.25 et 4 sur une échéance de 6 heures qui est choisi à la main et qui sert à modifier les intensités des échos. Leurs formes ne sont pas modifiées.

Les Canadiens travaillaient sur une méthode linéaire d'extrapolation de la variation en masse et en taille observée auparavant. Ils se sont bornés à des cellules d'une durée de vie supérieure à 100 minutes, un pixel était équivalent à une surface de 4 x 4 km. Leurs résultats étaient supérieurs à ceux obtenus par la méthode SHARP de Bellon/Austin (1978), mais leur conclusion est que l'amélioration est trop peu significative pour justifier les efforts qu'elle coûte. Il faut mentionner que Bellon et Austin ont considéré exactement cet effet de changement de forme et d'intensité comme obstacle principal à une prévision plus fiable (Bellon/Austin, 1984).

Le groupe de Champaign autour de John Vogel a étudié un système semi-automatique, où le programme propose au pilote une valeur de croissance en taille et en intensité. Celui-ci peut ensuite soit accepter cette valeur, soit la corriger. La base pour cette prévision d'évolution était également un modèle linéaire avec des valeurs limites qui ne devaient pas être dépassées. Leurs résultats donnaient une erreur de 30 % pour les fortes intensités (≥ 5 mm/h) pour une prévision à 30 minutes, qui s'élargit à 110 % pour une prévision à 120 minutes. Ils n'ont pas cependant fait une comparaison entre l'utilisation et la non-utilisation de leur module évolutif.

Walton/Johnson (1986) décrivent un modèle de prévision de pluie pour le système d'alerte de crues du projet NEXRAD (cf. 2.1.4.). Leur objectif est de modéliser les cumuls de précipitation à une échéance d'une heure. A partir d'une procédure de couplage, leur prévision quantitative est basée sur des méthodes statistiques prenant en compte une évolution probable. De cette façon, ils développent aussi des statistiques d'erreurs probables pour pouvoir guider les hydrologues qui seront les utilisateurs. Leur méthode est encore en train d'être mise au point.

Les résultats de ces études nous amènent à quatre conclusions :

- (1) il est normal d'étudier ce problème plus en profondeur, compte tenu de son importance statistique pour la prévision (fig. 4.7)

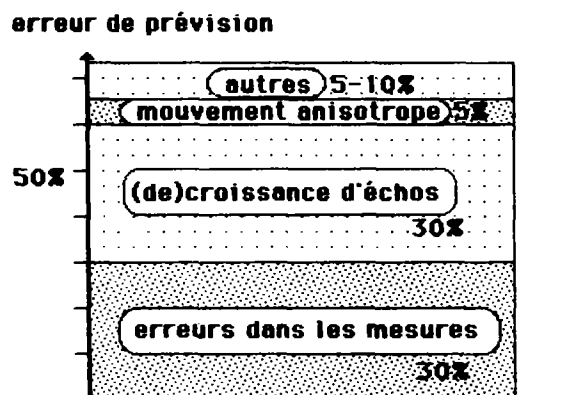


Figure 4.7: L'importance moyenne des sources d'erreurs pour la prévision (d'après une discussion avec A.Bellon, (cf. Einfalt et al., 1987))

- (2) une solution générale du problème d'une modélisation simple de l'évolution d'échos n'existe pas ;
- (3) le gain en hydrologie de l'intégration d'un modèle linéaire de croissance d'écho dans la prévision n'est pas encore connu ;
- (4) compte-tenu du résultat de Huff et al. (1980) sur un événement d'une journée, on peut espérer arriver à une modélisation linéaire qui sera valable pour un certain type de situations météorologiques.

La modélisation linéaire a donc été tentée en dépit des limites évidentes évoquées ci-dessus d'autant plus facilement que les outils de la reconnaissance des formes sont bien adaptés à cette tâche.

Dans le chapitre 7, nous étudierons sur nos sept événements de base l'effet induit par une telle modélisation linéaire du développement; elle va utiliser les moyens présentés dans le chapitre 3.5.2.

4.1.3. Mouvement anisotrope

L'erreur de prévision due au mouvement anisotrope est regardée par beaucoup d'auteurs comme négligeable sur un grand nombre de situations météorologiques (cf. fig. 4.7). Toutefois, dans les conditions intéressant l'hydrologie de pluies abondantes, on constate qu'un effet cyclonique est fréquemment présent. Un gros événement pluvieux avec effet cyclonique tel que celui de la nuit du 24 au 25 août 1987 en région parisienne (cf. chap. 8.11) pose des difficultés considérables aux services d'assainissement.

Dans ces conditions, seule une méthode qui possède la capacité de traiter différentes régions différemment paraît capable de donner de bonnes prévisions. A cause de cela, même les tenants de la méthode de corrélation croisée ont essayé de découper l'image pour traiter les parties résultantes de différentes manières (Collier, 1978; Blackmer et al., 1973).

Le mouvement anisotrope est pris en compte dans la méthode dérivée des outils théoriques de la reconnaissance des formes.

4.2. Facteurs liés à la technique radar

L'utilisation du radar comme instrument de mesure rend possible d'adopter pour la prévision de pluie une démarche qui ne soit pas essentiellement liée à des modèles statistiques (cf. les prévisions basées sur les seuls pluviographes, par exemple: Rodriguez-Iturbe/Eagleson, 1987; Schilling, 1983; Gupta/Waymire, 1977). Cependant, l'information supplémentaire demande une bonne analyse des données. Une critique et un traitement des données s'impose vu les altérations possibles de la mesure de pluie par le radar. Les causes les plus importantes de cette difficulté d'interprétation seront discutées par la suite.

4.2.1. Echos fixes

Un écho fixe est une réflexion du faisceau de radar qui n'est pas causée par la pluie. Normalement il s'agit des immeubles hauts ou des collines qui interceptent le faisceau. L'impact d'un tel phénomène est double:

- on mesure un faux écho de pluie dont l'intensité est supérieure à l'intensité réelle ;
- un écho fixe ne se déplace pas, il ne suit pas le déplacement général et il peut donc fausser le calcul.

Ce qui complique le problème c'est que la taille et l'intensité d'un écho fixe sont variables selon les conditions atmosphériques (on peut considérer les effet des propagations anormales comme des échos fixes temporaires). Pour contrer cet effet, il existe trois possibilités:

- (1) éliminer les échos fixes au niveau des mesures brutes du radar (analyse du signal, cf. Yoshino/Kozeki, 1985), ce qui nécessite un logiciel spécialisé à ce niveau-là.
- (2) mesurer avec une élévation supérieure de l'antenne radar, ce qui réduit la qualité des mesures en fonction de leur distance à l'émetteur (cf. Collier, 1985);
- (3) faire une interpolation spatiale à l'emplacement des échos fixes.

Parce que le radar de Trappes est équipé d'un logiciel éliminant les échos fixes (mais il n'est pas utilisé en permanence), les problèmes soulevés par les deux autres solutions ne se poseront qu'occasionnellement et ne seront donc discutés que brièvement.

La deuxième solution s'applique seulement si le radar donne le choix entre plusieurs angles d'élévation du faisceau (ce que le radar de Trappes ne permettra que plus tard). Des mesures avec une élévation suffisamment haute pour éviter l'obstacle seront insérées à la place de l'écho fixe et interpolées pour obtenir le "niveau général" de cette région et pour réduire l'influence de la distance sur la précision de la mesure (voir chap. 4.2.2.). La performance de cette solution est supérieure à celle de l'interpolation, surtout en utilisant plusieurs élévations pour la correction. Une présentation des données qui sont prises toujours à la même altitude s'appelle CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator, annexe 6).

En ce qui concerne la troisième solution, l'interpolation, la difficulté est: quelle est la méthode d'interpolation la mieux adaptée à ce problème spatial et la plus rapide? Il semble qu'il n'y ait pas d'algorithme "naturel" qui s'applique facilement. Dans la littérature sur la prévision de la pluie, il y a peu de précisions sur cette question.

4.2.2. L'influence de la distance

A une distance X de l'antenne, l'altitude H à laquelle est mesurée la réflectivité (donc indirectement la pluie) est fonction de l'angle d'élévation φ de l'antenne radar ("site") et de X (cf. fig. 4.8). H est une fonction croissante de X et de φ . Donc, plus un point est éloigné de

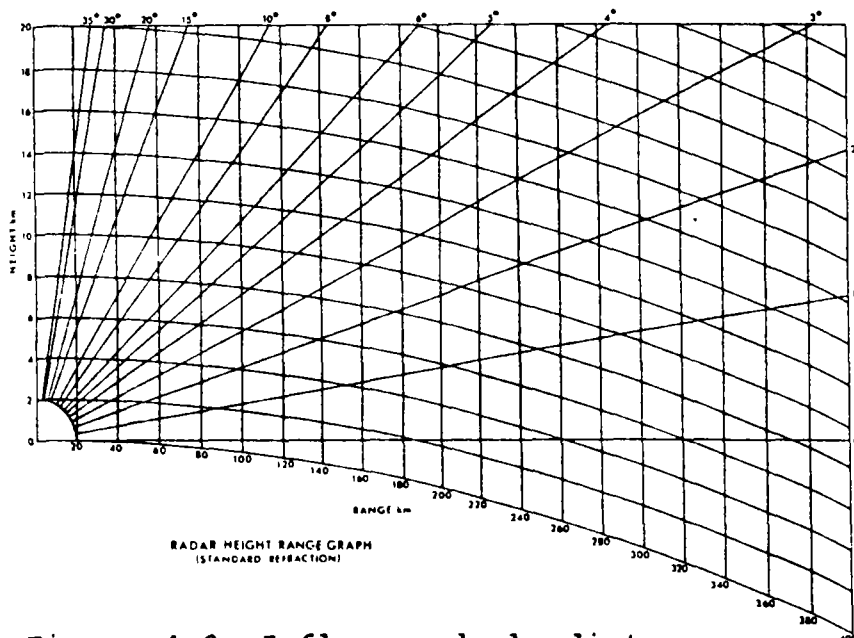


Figure 4.8: Influence de la distance

l'antenne (et plus l'antenne pointe vers la haut), plus le risque que le radar "ignore" des précipitations (formées à une altitude inférieure à $H(X, \varphi)$) est grand. Une formule approximative pour H est (Smith, 1986):

$$H(X, \varphi) \approx X (3 \cos \varphi / 8E + \sin \varphi)$$

où E représente le rayon de la terre

Le niveau le plus fiable de mesures est la tranche 0-3000 m. Si la mesure s'effectue à une altitude $H(X, \varphi) > 3000$ m, il y a forcément une perte d'information, une sous-évaluation de la situation réelle.

Cet effet est de plus intensifié à partir de $X = 100$ km par la rotondité de la terre.

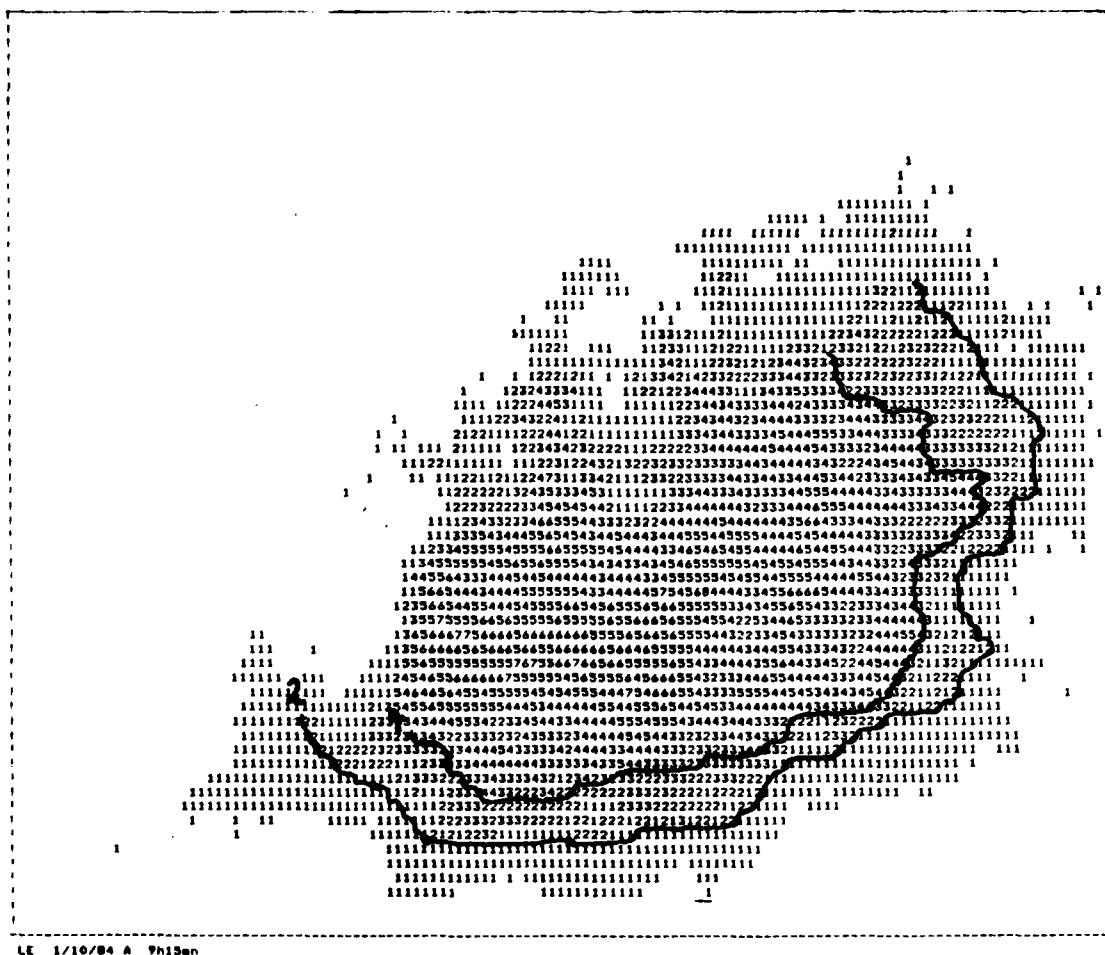


Figure 4.9: 1/10/84, influence de la distance

Sur l'image radar, ce phénomène se traduit ainsi: au-delà d'une distance X du radar, l'intensité enregistrée ne dépasse plus une certaine valeur. Cela se voit clairement dans la figure 4.9 où les limites pour les niveaux de réflectivité de 2 et 4 se situent à 170 km et 150 km du radar respectivement.

Travailler sur un niveau d'intensité plus élevé, évite donc une partie de cette influence. On néglige les échos au-delà d'une certaine distance, mais cela n'est pas dangereux si l'on dispose d'autres informations réparties sur l'image.

4.2.3. L'influence du bord de l'image

Les caractéristiques et la prévision d'un écho situé en bordure d'une image risquent d'être erronées car on ne dispose pas de l'information complète. Par conséquent:

- on n'obtient pas le vrai centre de gravité de l'écho pluvieux ;
- à la place d'un écho on n'obtient que quelques-uns de ses morceaux (voir la figure 4.10);
- le vecteur du mouvement ne peut pas être calculé correctement.

Evidemment, toutes les autres caractéristiques comme la taille, les moments d'inertie, la distribution des intensités, ... sont également biaisées par l'effet du bord.

A cause de cela, un grand nombre de chercheurs travaillant sur des modèles utilisant la reconnaissance des formes, éliminent les échos touchant le bord d'une image, notamment Blackmer et al., Ostlund (1973) et Ciccione/Pircher.

Toutefois, il y a une possibilité de mieux exploiter les informations de ces échos: l'utilisation d'un niveau d'intensité plus haut.

Cette approche n'élimine pas l'influence du bord, néanmoins, elle permet, en présence d'échos larges et structurés à l'intérieur, d'isoler les parties les plus intenses de chaque écho large. Ainsi on se définit des échos plus petits pour lesquels il est alors moins probable qu'ils soient tronqués par le bord. Cette utilisation d'un niveau de pluie bien choisi doit s'appliquer à toute l'image afin de pouvoir comparer les différents échos d'une même image.

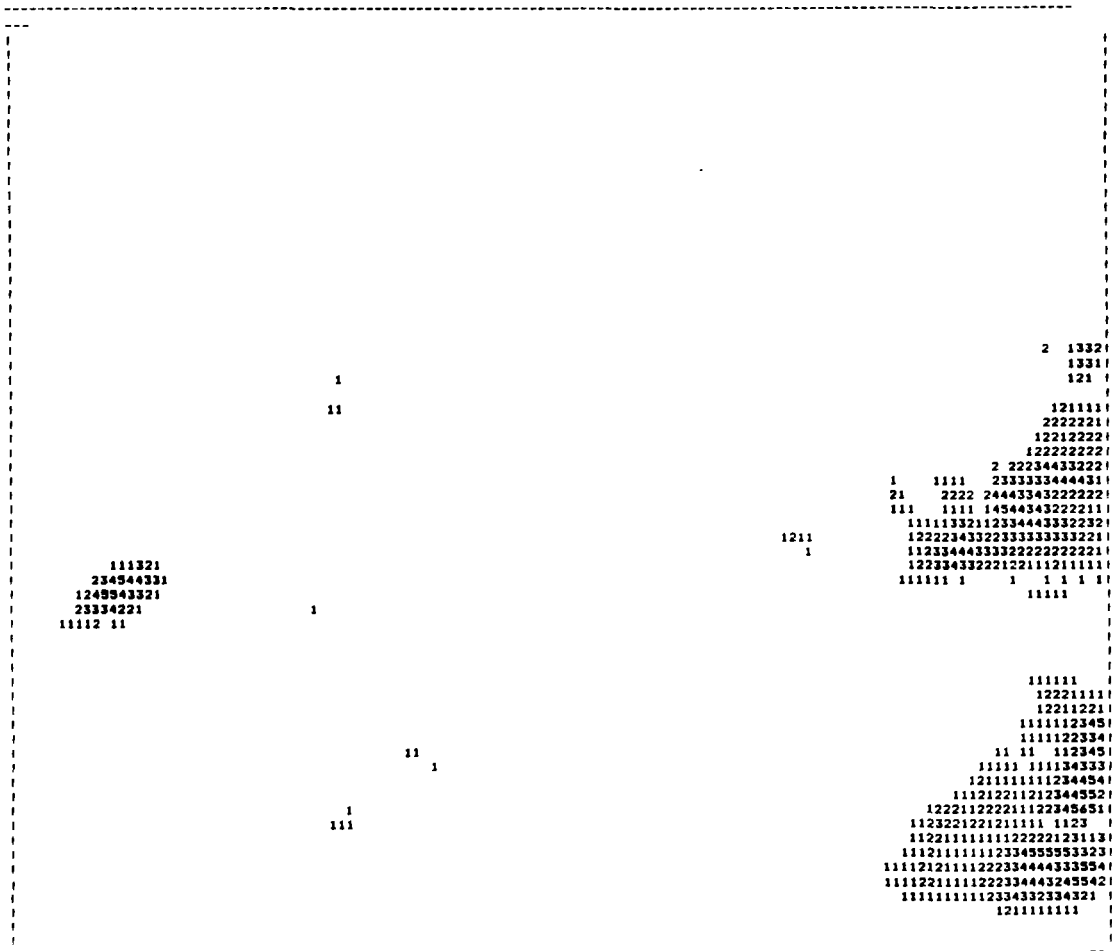


Figure 4.10: Influence du bord de l'image

Cette procédure entraîne alors une réduction de l'ensemble de l'information d'une image. Compte-tenu des structures cellulaires de forte intensité observées à l'intérieur de grands échos (cf. chapitre 4.1), on peut néanmoins s'attendre à ce que la qualité de l'information ne se dégrade pas.

Bien entendu, pour les échos qui malgré cette manipulation restent attachés au bord, on n'aura pas d'autre choix que de les ignorer pour le couplage et le calcul du mouvement et ensuite de prévoir leur déplacement par la translation moyenne.

Deux remarques concernent les interdépendances entre les différents remèdes et phénomènes :

- (1) lorsque l'influence de la distance se fait sentir (cf. chapitre 4.2.2.) on va par la procédure décrite vraisemblablement éliminer les (faibles) échos au bord. Ceci réduit alors le rayon d'informations autour du radar, mais on tranche en même temps entre informations plus fiables (gardées) et moins fiables (rejetées).
- (2) dans le cas d'un écho coupé en deux par l'influence du bord comme dans la figure 4.10, la méthode d'échos imaginaires (voir chapitre 4.2.4 et chapitre 3.3) peut corriger cet effet.

4.2.4. Agrégation et séparation

Il y a trois facteurs possibles qui peuvent causer une agrégation de deux échos ou leur séparation :

- (1) une croissance (ou diminution) d'au moins un des échos ;
- (2) un mouvement différentiel de deux échos ;
- (3) un passage du bord de l'image par un écho.

8 11 84 12 45

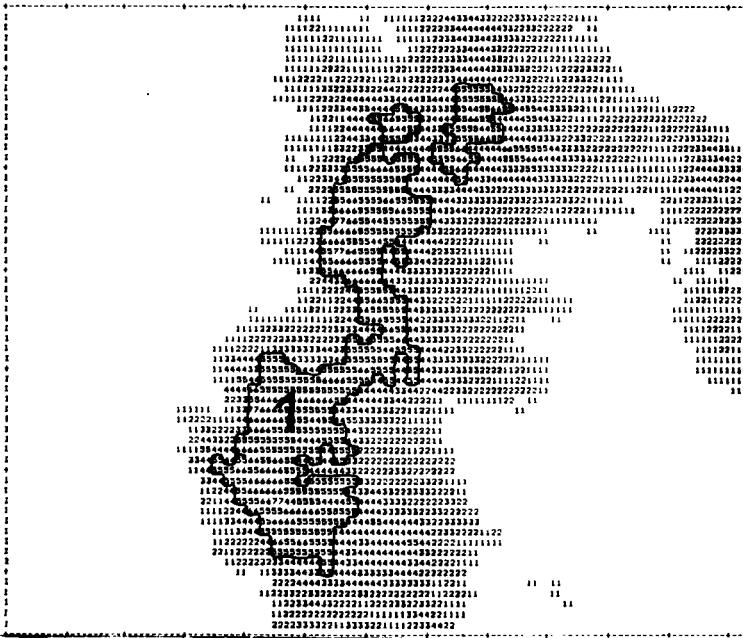


Figure 4.11a et 4.11b : 8/11/84- échos 1 et 2

Les points (1) et (2) sont des effets de phénomènes météorologiques tandis que le troisième point est purement dû aux limites de détection du radar. Les causes de ces trois facteurs ont déjà été présentées dans les chapitres 4.1.2, 4.2.1 et 4.2.3 respectivement.

Quelque soit l'origine de ce problème, il peut être résolu de la même façon: par la définition sur l'image de régions qui ont le même comportement. Ces régions sont définies en fonction du regroupement intuitif parmi des échos d'une image. Autrement dit, chaque région va se constituer d'un ou de plusieurs échos dans la même zone de l'image. Nous supposons donc que des échos qui sont proches entre eux sont susceptibles d'avoir un comportement semblable. Notre procédure de création d'"échos imaginaires", présentée dans le chapitre 3.3, tient compte du fait que ceci n'est pas toujours valable : elle garde en mémoire les échos individuels pour permettre un test de la validité de cette proposition.

Dans le cas d'une séparation par exemple, on peut alors retrouver les deux échos dans une région ayant des caractéristiques proches de l'écho initial et permettant en conséquence sa reconnaissance (fig. 4.11a et 4.11b).

Il faut cependant noter que le comportement d'un écho réuni ne peut pas toujours être dérivé des échos initiaux. On a observé que de tels échos peuvent s'intensifier et décélérer, voire devenir stationnaires (Vogel, 1986; Huff, 1976) et par conséquent, ils constituent une menace particulière pour un réseau d'assainissement.

4.3. Réflexion sur le temps de calcul

Le traitement de deux images radar pour obtenir une prévision demande un vaste nombre d'opérations de calcul. Nous rappelons qu'une image contient 65536 points, et le traitement d'image à entreprendre s'applique à chacun de ces pixels. Il est indispensable de trouver des algorithmes puissants qui ne font pas d'opérations superflues si on veut tenir compte des conditions de base pour l'application opérationnelle (cf. chap. 9).

Comme exemple, on va d'abord développer un algorithme pour le calcul de la corrélation croisée entre deux images. Bien entendu, le produit résultant peut encore être simplifié et par conséquent, accéléré.

La deuxième partie de ce chapitre va présenter pour le modèle basé sur la reconnaissance des formes le concept de stockage et d'accès à toutes les données liées à une image.

Ainsi, on va mettre sur pied une organisation des données permettant d'abaisser le temps de calcul en-dessous des limites fixées dans le chapitre 1 (1 minute).

4.3.1. Le calcul de la corrélation croisée normale

La formule du coefficient de corrélation croisée ρ en deux dimensions n et m pour deux images M et P est la suivante:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (p_{ij} - \bar{p}) (m_{ij} - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (p_{ij} - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (m_{ij} - \bar{m})^2}}$$

où p_{ij} - le point (i,j) de l'image P
 m_{ij} - le point (i,j) de l'image M
 \bar{p} - la moyenne des valeurs de P
 \bar{m} - la moyenne des valeurs de M

Soit $N = m*n$, donc chaque calcul de ce coefficient exige $12N+1$ opérations et le calcul de deux racines carrées car avec

$$\rho = \frac{c_1}{\sqrt{c_2 * c_3}}, \text{ et}$$

$$c_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (p_{ij} - \bar{p}) (m_{ij} - \bar{m})$$

$$c_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (p_{ij} - \bar{p})^2$$

$$c_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (m_{ij} - \bar{m})^2$$

on a besoin de la connaissance des valeurs \bar{p} et \bar{m} avant toutes les sommations.

4.3.1.1. La corrélation croisée normale rapide

Rappelons que, sous condition que $n = m$,

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} = n^2 \bar{p}$$

De cette façon, les valeurs c_1 , c_2 et c_3 peuvent être reformulées d'une manière plus rapide à calculer :

$$c_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} m_{ij} - n^2 \bar{m} \bar{p}$$

$$c_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij}^2 - n^2 \bar{p}^2$$

$$c_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}^2 - n^2 \bar{m}^2$$

Le nombre d'opérations à exécuter est maintenant de $8N + 13$ opérations et deux racines.

4.3.1.2. La corrélation croisée binaire

On peut aussi introduire la corrélation binaire qui donne une réduction importante en temps de calcul. Si on regarde chaque image P d'une façon "binaire" (c'est-à-dire: pluie = 1, non-pluie = 0), l'arithmétique suit les deux règles spéciales:

$$(i) \quad x^2 = x, \quad \forall x \in P$$

$$(ii) \quad \sum_{i=1}^n x_i = n \bar{x} = |\{ x_i \neq 0 \mid x_i \in P \}|$$

Ainsi on obtient des formules encore plus simples pour c_2 et c_3 :

$$c_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} m_{ij} - n^2 \bar{m} \bar{p}$$

$$c_2 = n^2 \bar{p} - n^2 \bar{p}^2$$

$$c_3 = n^2 \bar{m} - n^2 \bar{m}^2$$

et le nombre d'opérations se réduit à $4N + 19$ opérations et deux racines. Néanmoins, si n est très grand, cette réduction du calcul par le facteur 3 n'est pas assez importante, surtout parce que le coût de calcul dépend toujours du nombre de pixels d'une image.

4.3.1.3. L'algorithme de recherche

Si l'on suppose une distribution de la fonction de corrélation croisée qui est assez régulière et douce, on peut développer une méthode itérative pour la recherche du maximum de cette fonction. Pour cette raison une définition de "régularité et douceur" doit être donnée: il faut qu'on trouve le maximum absolu de la fonction quand on

- choisit un point au hasard,
- va en direction de la plus grande valeur d'un voisinage de ce point,
- choisit le point avec cette valeur maximale comme nouveau point et
- réitère ce processus.

On peut donc définir une méthode de recherche de la manière suivante:

- (1) choix d'un point X pour commencer
ce point est normalement l'ancien vecteur de prévision (si on en a déjà calculé un), sinon égal au vecteur du vent
- (2) calcul des coefficients de corrélation croisée (CC) pour les points $X, 1, 2$ (fig. 4.12)
- (3) marquer les points dont la valeur de CC est plus grande que celle de X ,
- (4) calcul des corrélations croisées pour les points séparés par deux pixels du point X ou des points marqués

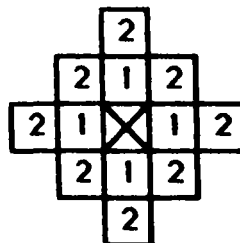


Figure 4.12: La région de recherche

(5) détermination de la valeur maximale de ces points examinés.

- (a) si le maximum se trouve au point X : fin
- (b) sinon: le point où le maximum de CC est atteint est le nouveau point X et on continue en allant à (2)

En moyenne cette méthode économise 50% du temps qui est nécessaire pour trouver le maximum de la fonction de corrélation croisée lorsqu'on calcule ce coefficient dans un rectangle autour de X et qu'on cherche après coup le maximum de toutes ces valeurs. On constate que, plus la zone où l'on effectue la recherche est grande, plus l'algorithme de recherche permet d'économiser du temps par rapport à l'algorithme classique (tableau 4.3.).

| | méthode classique sans recherche | recherche maximum | recherche moyenne |
|---------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| formule | $(2L + 1)^2$ | $(K + 1) * 36 + 9$ | $\frac{K+1 * 20 + 3}{2}$ |
| L ou K | | | |
| 5 | 121 | 225 | 63 |
| 10 | 441 | 405 | 113 |
| 15 | 961 | 585 | 163 |
| 20 | 1681 | 765 | 213 |

2L + 1 - longueur du carré dont on calcule le CC
K - nombre maximal d'itérations

Tableau 4.3 : Nombre de calculs du coefficient de corrélation croisée

Une régression linéaire simple pour le temps de calcul de cette méthode donne la formule indiquée dans le tableau 4.4. En appliquant cette formule aux valeurs du tableau 4.3, on détermine les temps CPU du tableau 4.5.

régression simple pour le temps de calcul de bics.

$$\text{sec} = 1.6 \text{ cc} + 19$$

avec

sec - temps de calcul

cc - nombre de CC à calculer

Tableau 4.4: Formule de régression

En général le seul inconvénient de l'algorithme de recherche est qu'on ne peut pas vérifier par avance si la fonction de corrélation croisée est d'une forme assez lentement variable pour que son application soit justifiée.

| L / K | "classique" | recherche max | recherche moy |
|-------|-------------|---------------|---------------|
| 5 | 213 s | 379 s | 120 s |
| 10 | 725 s | 667 s | 200 s |

Tableau 4.5: Temps CPU estimé pour bics

4.3.2. "Reconnaissance des formes": organisation et exploitation de l'information

Le temps de calcul d'un modèle type corrélation croisée a été facile à estimer. Pour un modèle tenant compte des différents échos de pluie et de leurs caractéristiques, il faut d'abord analyser la façon d'organiser ces informations.

Dans un deuxième temps, on va étudier la consommation en temps de calcul et proposer des solutions pour les cas difficiles.

4.3.2.1. L'organisation de l'information sur une image

A partir de l'image brute, un tableau de 256 x 256 pixels, on va d'abord réorganiser ces points en échos. Ceci se fait à l'aide d'un vecteur qui contient toutes les coordonnées de pixels avec une valeur de pluie. Ces coordonnées sont rangées de telle façon que tous les points d'un écho soient stockés dans un intervalle connexe (fig. 4.13). Ainsi, on obtient une numérotation naturelle des échos, selon leurs places dans ce vecteur.

Pour travailler au niveau des échos, il suffit maintenant d'extraire les "adresses initiales" des échos dans le vecteur de pixels et leurs tailles. On arrive alors à un vecteur des échos qui contient le nombre cumulé d'éléments, des échos dans le vecteur de pixels, comme illustré dans l'exemple de la fig.4.13.

Si l'écho n° 1 est constitué de deux éléments et l'écho n° 2 de 3 éléments, les deux premiers éléments du vecteur de pixels sont occupés par les coordonnées des pixels de l'écho n° 1 et les 3 éléments suivants du vecteur de pixels par les coordonnées des pixels de l'écho n° 2. En même temps, le premier élément du vecteur des échos a la valeur 2 et le deuxième la valeur 5, etc.

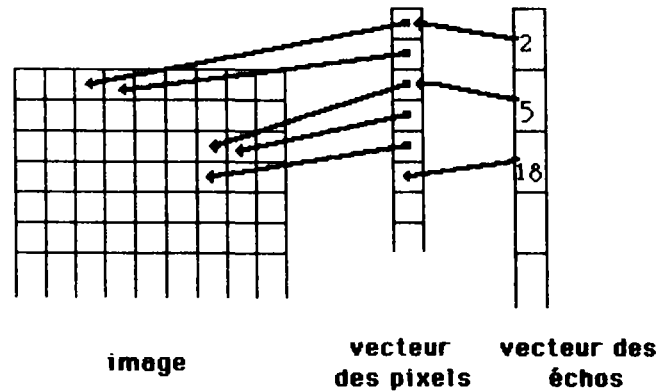


Figure 4.13 : Organisation du stockage des données

Par la suite, on peut alors compléter ce vecteur des échos en reliant à chaque écho ses propres caractéristiques. Autrement dit, on transforme le vecteur des échos en une matrice de caractéristiques des échos dont la première colonne est le vecteur des échos (fig. 4.14). Son organisation technique sera exposée dans l'annexe 1. Grâce à cette structure, l'accès aux informations des échos est très rapide. Ses inconvénients sont ses besoins en place mémoire, surtout pour le vecteur de pixels qui double quasiment la place occupée par l'image seule.

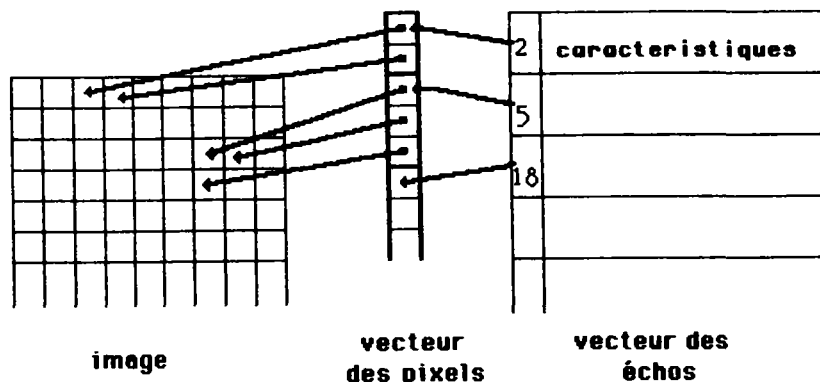


Figure 4.14 : Stockage des caractéristiques

4.3.2.2. La consommation en temps calcul

Toutefois, pour atteindre une telle organisation facilitant le travail sur les échos et leurs caractéristiques, il faut la construire. C'est l'étape d'agrégation du chapitre 3.1.

Parmi toutes les étapes, c'est en général la plus coûteuse en temps de calcul dépassant souvent une minute CPU sur le VAX 750 du CERGNE (fig. 4.15). Par exemple elle utilise 21:22 min CPU des 22:27 min utilisées pour l'événement du 1 octobre 1984 (6 images), soit plus de 3 minutes par image.

La figure 4.16 montre que le temps calcul de l'algorithme de cluster dépend du nombre de pixels à calculer (d'une manière non-linéaire). Une régression sur les valeurs présentées dans tableau 4.6, qui ont été sélectionnées après une étude détaillée de l'algorithme d'agrégation donne une assez bonne estimation de la vitesse de calcul (nombre de pixels traité par seconde).

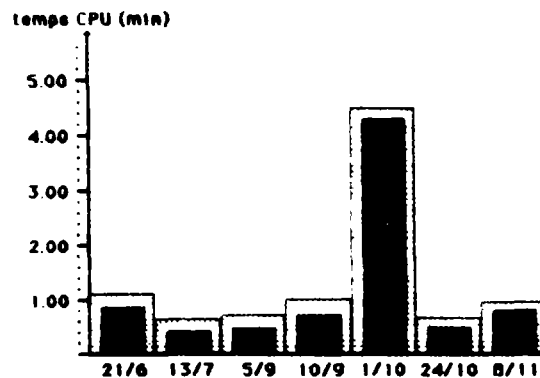


Figure 4.15: Partie en temps de calcul de l'agrégation (en foncé)

régression multiple pour l'algorithme d'agrégation.

$$\text{pix/min} = 316.3 \text{ pix/f} + 109.8 \text{ pc} - 104.3 \text{ spf} - 1585. \text{ sfl} + 6834$$

avec

pix - pixels
min - minute
f - fraction d'un écho sur une ligne
spf - écart-types de pix/f
sfl - écart-types de f/ligne
pc - pourcentage de lignes avec pluie

sur 1068 images on a trouvé les valeurs moyennes suivantes.

| pix/f | spf | pc | f/ligne | sfl | pix/image | pix/min | sec/image |
|-------|-------|-------|---------|------|-----------|---------|-----------|
| 6.35 | 12.04 | 0.536 | 1.98 | 2.69 | 3218 | 3382 | 57 |

Tableau 4.6 : Régression du temps de calcul

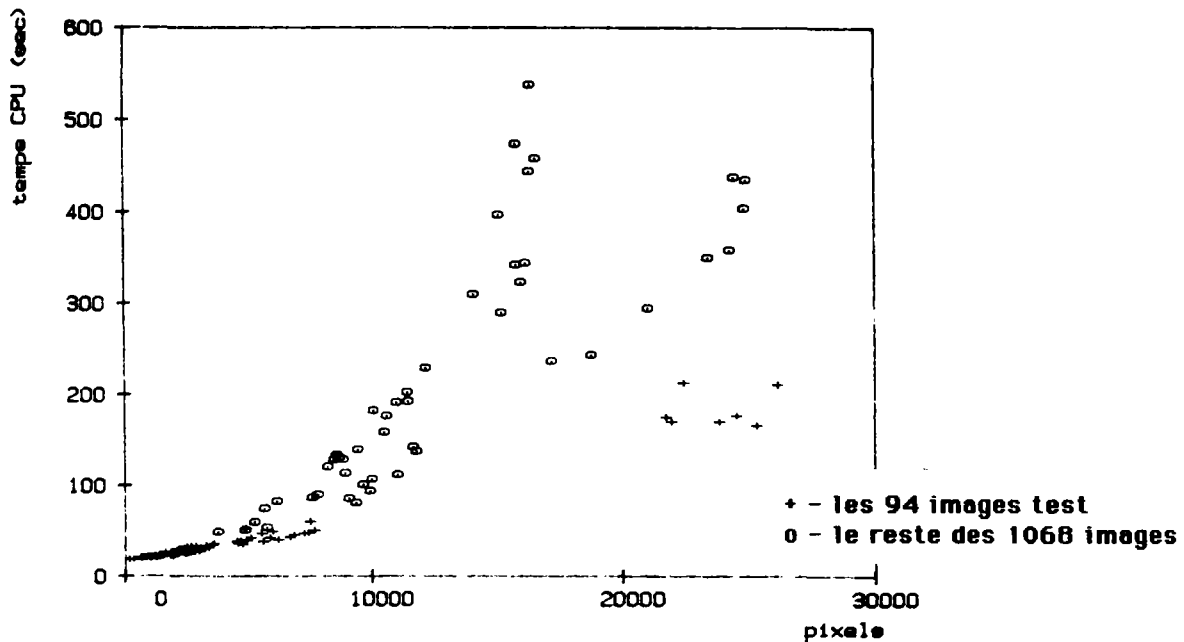


Figure 4.16: Temps de calcul en fonction des pixels

Les étapes de reconnaissance des formes qui ne travaillent pas au niveau des données brutes, sont très rapides et elles n'ont pratiquement aucune influence sur le temps de calcul global.

En conséquence, il faut donc réduire le temps de calcul de cet algorithme d'agrégation. Mais, parce que l'algorithme lui-même est déjà optimisé au niveau du temps de calcul (voir Einfalt, 1983), on doit chercher des moyens réduisant le nombre de pixels à traiter. Pour cela, il y a trois approches majeures:

- la réduction de la partie de l'image sur laquelle on travaille ;
- l'élargissement de la taille d'un pixel
- le choix d'un certain niveau d'intensité au-dessus duquel on travaille

La première solution a comme inconvénient qu'elle réduit le rayon spatial d'information. Ainsi, on diminue l'horizon de prévision parce qu'on ne voit plus les pluies arriver d'une distance supérieure à ce rayon. On crée en même temps une influence du bord plus importante et on réduit l'influence de la distance avec une telle image plus petite.

La deuxième solution est utilisée en Angleterre pour accélérer leur programme de prévision (de 5 x 5 km à 20 x 20 km). Pour l'utilisation en hydrologie urbaine, une telle discrétisation moins précise entraîne des pertes d'information qu'on veut justement éviter en utilisant le radar à la place des pluviographes seuls.

La troisième solution exige un choix préalable du niveau des intensités à prendre en compte. Habituellement (Blackmer et al., 1973) on fixe un seuil au-dessus duquel on travaille, ce qui est raisonnable en hydrologie : on se concentre sur les effets les plus dangereux et néglige les parties de pluie faible. Le problème qui se pose est le choix d'un tel niveau.

Nous avons choisi d'adopter la troisième solution car elle n'entraîne pas de pertes en information spatiale comme les deux premières possibilités. Négliger les pluies les plus faibles nous paraît acceptable. On les déplacera dans la prévision par le mouvement général.

Une analyse de l'algorithme utilisant les 100 %, 50 %, 20 % ou 10 % des pixels les plus intenses a prouvé un gain en vitesse de calcul considérable (fig.4.17). Cependant, dans certains cas, la perte d'information par cette méthode est trop importante. Une analyse plus détaillée a montré que cette perte d'information n'existait que pour des images déjà constituées de peu de points (tableau 4.7). De plus, nous nous sommes aperçus qu'il semble exister une plage du nombre de pixels sur une image qui garde d'une façon optimale l'information nécessaire pour la prévision. Celle-ci se situe entre environ 500 et 2500 pixels, comme on le voit dans le tableau 4.7. Pour garantir une vitesse de calcul élevée, nous allons choisir le niveau d'intensité qui correspond à un niveau pour lequel il existe 1 500 pixels dont la réflectivité est supérieure au seuil.

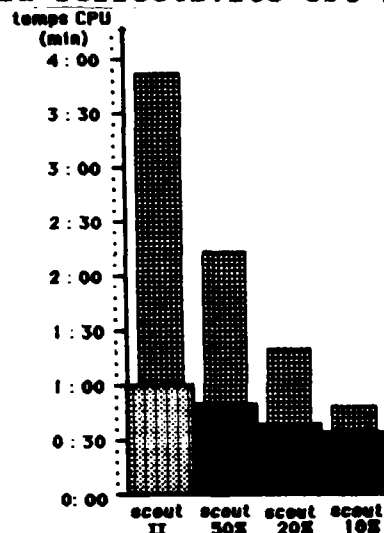


Figure 4.17: Temps de calcul pour les variantes 100%, 50%, 20%, 10%

Cette décision nous semble justifiée aussi bien par ses effets sur le temps de calcul que par ses effets bénéfiques secondaires : la réduction de l'influence du bord et la prise en compte préférentielle des parties présentant un risque de ruissellement urbain significatif.

Il faut noter que ce dernier point constitue une approche nouvelle en traitement d'images radar. C'est la première fois que les préoccupations des utilisateurs sont déjà prises en compte à l'étape de construction d'une méthode de prévision.

| | | sc 100% | sc 50% | sc 20% | sc 10% |
|-------|-----------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| 21/6 | CC pts | 80.4 5 500 | 81.7 3 200 | 82.2 1 700 | 75.3 * 1 000 |
| 13/7 | CC pts | 40.6 1 000 | 40.6 800 | 39.2 300 | 25.7 * 150 |
| 5/9 | CC pts | 54.5 2 000 | 56.5 1 700 | 54.7 700 | 52.6 500 |
| 10/9 | CC pts | 56.3 2 200 | 63.4 1 300 | 52.8 * 600 | 56.3 * 300 |
| 1/10 | CC pts | 88.0 24 000 | 91.0 13 000 | 91.3 6 000 | 91.4 3 000 |
| 24/10 | CC pts | 60.8 2 400 | 68.9 2 300 | 56.5 1 500 | 56.5 1 300 |
| 8/11 | CC pts | 80.7 6 000 | 79.7 3 800 | 79.3 1 700 | 83.4 1 000 |

Tableau 4.7: Influence du nombre de pixels les plus intenses retenus dans l'image (pts) sur la performance (en corrélation croisée) de la méthode de prévision

*

forte dégradation de l'information



meilleure performance

TROISIEME PARTIE : COMPARAISON ENTRE PLUSIEURS METHODES DE PREVISION SUR UN ECHANTILLON TEST

Cette partie présente des tests effectués avec plusieurs modèles et un échantillon de données de 94 images aux caractéristiques météorologiques différentes.

Dans une première partie, on va présenter les méthodes comparées.

Ensuite, on caractérisera les différentes séquences de l'échantillon test.

Dans un troisième temps, on discutera des critères de performance utilisables, utiles et utilisés.

La quatrième partie sera consacrée à l'analyse des résultats des tests effectués et aux conséquences à en tirer.

CHAPITRE 5

LES METHODES DE PREVISION



Six méthodes ont été choisies afin de comparer leurs performances. Premièrement il s'agit de la persistance (pers), c'est-à-dire qu'on suppose simplement que la situation ne changera pas. Comme prévision on utilise alors l'image actuelle mesurée.

Deuxièmement, on va définir une version "vent" qui déplace toute l'image selon le vent enregistré par le radiosondage de Trappes.

En troisième lieu, on a retenu la méthode de corrélation croisée binaire (bics), présentée au chapitre 4.3.1.3.

Enfin, on a choisi trois versions fondées sur la reconnaissance des formes:

- une version "standard" (scout II) : c'est une amélioration du modèle SSCOUT (Einfalt/Schilling, 1984); datée d'octobre 1986. On peut la considérer comme étant au niveau de la plupart des méthodes historiques fondées sur la reconnaissance des formes (cf. chap. 2).
- la version mise au point dans cette thèse (scout II.0) qui utilise le concept des échos imaginaires et qui choisit un niveau d'intensité de pixels approprié.
- une version préliminaire (scout II.c) présentant une tentative de modélisation du processus de croissance et de décroissance des cellules pluvieuses sur la base de scout II.0.

5.1. La persistance

Contrairement au procédé de prévision habituel à l'aide de deux images mesurées (image 1 et image 2 dans fig. 5.1), la persistance utilise directement l'image 2 comme image prévue.

Evidemment, cette méthode n'est pas très intelligente, mais une vraie méthode de prévision doit avoir une performance supérieure à n'importe quelle méthode simpliste comme celle-ci.

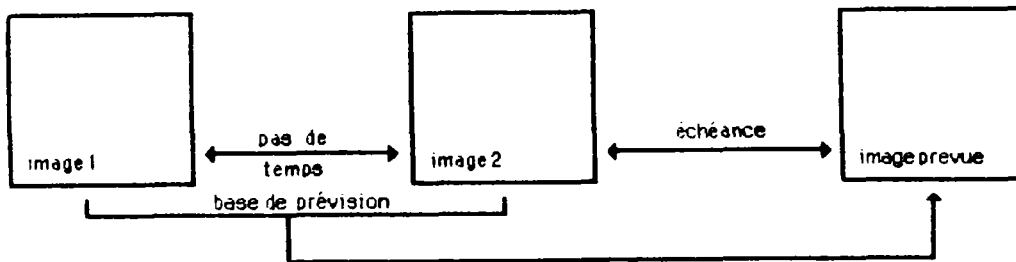


Figure 5.1: Schéma de prévision

5.2. Le vent

Au centre météorologique de Trappes, on fait des mesures par radiosondage toutes les 12 heures. Parmi les paramètres mesurés se trouvent la pression atmosphérique, la température, l'humidité, la force et la direction du vent sur plusieurs niveaux. De ces données on peut déduire des indications sur la stabilité-instabilité atmosphérique ainsi que sur le mouvement général des champs de pluie.

Ces données de vent peuvent être considérées comme fiables à la condition que la situation générale n'ait pas changé entre l'instant du radiosondage et celui de la prévision. Ceci n'est pas assuré en particulier en présence de fronts qui passent par le point de mesures.

On pressent déjà que l'utilisation du vent, mesuré une fois toutes les douze heures, n'est pas fiable dans certains cas de figure. Mais, c'est une méthode presque aussi simple à utiliser que la persistance. On va l'appliquer en déplaçant toute l'image par le vecteur du vent mesuré.

5.3. La corrélation croisée binaire

La troisième méthode de référence est la corrélation croisée binaire (Ciccione/Pircher, 1984), utilisée par la Météorologie Nationale en France, avec algorithme de recherche (Einfalt, 1983). Elle sert de méthode de référence car elle a une performance relativement stable et fiable et car elle est déjà utilisée de manière opérationnelle.

L'algorithme implanté par nos soins (décrit au chap. 4.3.1.3) est plus lent que celui de Austin et Bellon (cf. Bellon, 1987), et donc, on ne comparera pas son temps de calcul avec celui des autres méthodes.

5.4. La version scout II

Comme toute méthode de reconnaissance des formes appliquée aux prévisions radar, elle se constitue de quatre parties indépendantes (chap.3).

1e étape : La définition des échos

On définit un niveau de pluie fixe tel que toute valeur qui est supérieure à zéro est regardée comme pluie. La taille minimum des échos est déterminée à 5 pixels (= 12.8 km²), et les autres pixels pluvieux sont collectés par une procédure de "garbage collection" (collecte des déchets), qui les réunit dans un écho artificiel pour les déplacer à la fin selon le mouvement général. Cette procédure de collecte est la seule différence importante entre l'algorithme d'agrégation de SSCOUT et celui-ci. De cette manière, on obtient la structure d'organisation qui est décrite dans 4.3.2.1.

2e étape : Le calcul de leurs caractéristiques

Comme déjà mentionné et expliqué au chapitre 3.2, on a choisi comme caractéristiques des échos la taille, la masse, le centre de gravité, l'ancien vecteur de déplacement, le nombre d'identifications précédentes, les moments d'inertie, les axes d'inertie, la distribution des intensités et deux indices de croissance.

3e étape : Le couplage

Il y a deux grands modules dans cette partie, le choix et le contrôle (fig. 5.2):

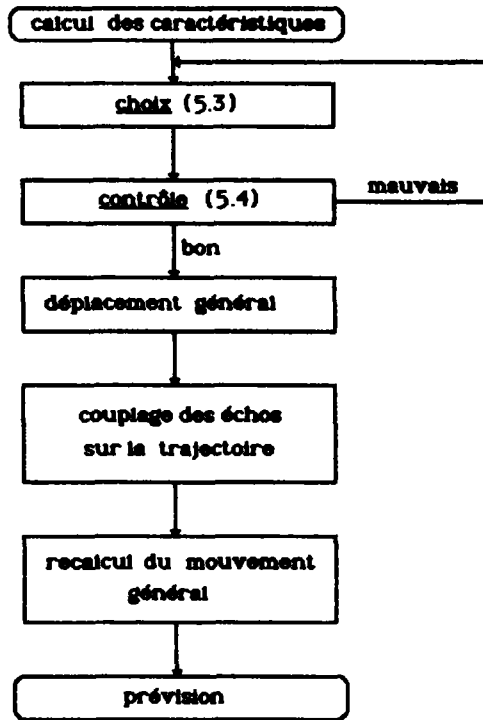


Figure 5.2

- le module de choix décide à partir de certains critères de similarité entre les échos si un couplage est possible,
- le module de contrôle examine si ce couplage a été bien fait. Pour cela, il utilise des règles heuristiques simples et soit déclenche de nouveau le processus de couplage avec des paramètres de décision modifiés soit fait progresser le programme en cas de couplages suffisamment bons.

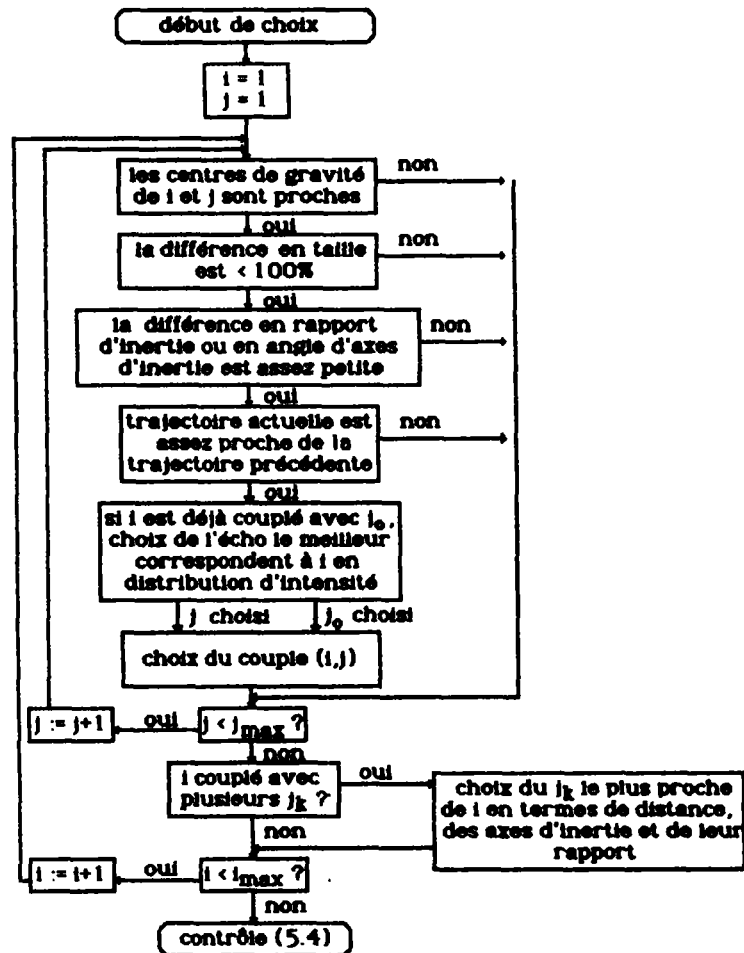


Figure 5.3

Le choix se fait de la manière suivante :

- 1) Pour chaque écho i de l'image M (avec centre de gravité c_i) on recherche les échos j de l'image P (avec centre de gravité c_j) dont les centres de gravité vérifient

$$\|c_i - c_j\| < 100 \text{ km/h} * dt$$

dt étant le pas de temps entre les images M et P .

- 2) Ensuite, la différence en taille entre les échos trouvés par 1) et l'écho i est analysée. Tout écho dont la taille fait plus du double ou moins de la moitié de la taille de l'écho i est rejeté.
- 3) Pour être choisis, les échos i et j doivent vérifier une des deux conditions suivantes :

- soit leur différence en élongation ne dépasse pas une valeur DINERT,
- soit leur différence en angle de l'axe principal d'inertie est plus petite que DANGLE.

Ces deux valeurs, DANGLE et DINERT, sont prédéfinies mais elles peuvent être modifiées par le module contrôle.

- 4) Après cela on regarde si l'écho i est déjà couplé avec un écho j_0 . En ce cas on compare les écarts-types des distributions d'intensité des couples (i,j) et (i,j_0) , et on choisit l'écho le plus proche de l'écho i . Si c'est l'écho j , on obtient un nouveau couple (i,j) .
- 5) Si i a été l'objet d'un couplage au pas de temps précédent, on teste si la trajectoire du couple (i,j) correspond assez bien à la trajectoire précédente de l'écho i . La différence en mouvement doit être limitée par une valeur DIST, qui est déterminée au début des prévisions et éventuellement modifiée par le module de contrôle. Le test reflète le fait qu'un écho a normalement un déplacement homogène. Il faut toutefois autoriser de légères modifications du barycentre dues à un changement de forme d'un écho.
- 6) A la fin on vérifie encore si l'écho j du couple (i,j) a déjà été couplé avec d'autres i_1, \dots, i_k . Dans ce cas on choisit le i_k qui est le plus proche de l'écho j en termes d'axes d'inertie et de moments d'inertie.

Après le choix de tous les échos possibles, on entre dans le module de contrôle de couplage (fig. 5.4):

- (1) Tous les couplages d'échos stationnaires sont exemptés du calcul d'un mouvement général et marqués en conséquence.

- (2) Le vecteur moyen \bar{v}_t de tous les échos couplés est calculé; il est une moyenne des vecteurs individuels des échos identifiés, pondérés par la masse des échos (le flux).
- (3) Les couplages qui s'éloignent trop de la trajectoire générale (en fonction de DIST) sont éliminés.

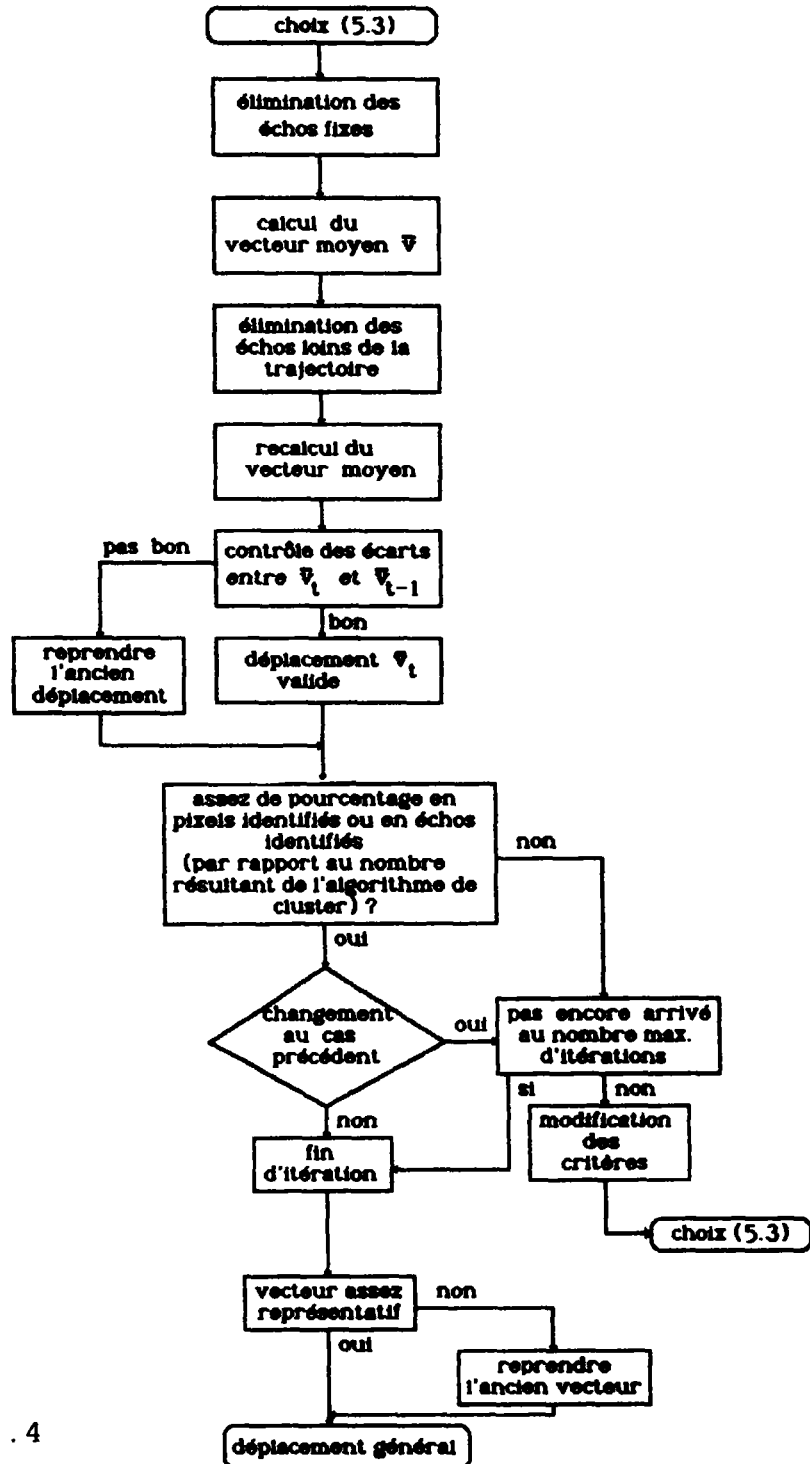


Figure 5.4

- (4) Le vecteur moyen v_t est recalculé.
- (5) Si l'écart de v_t et v_{t-1} est trop grand (la valeur maximale autorisée est fonction de DIST et du nombre des bonnes estimations antérieures du vecteur moyen), v_t est considéré comme non fiable et à la place on reprend v_{t-1} comme vecteur du mouvement général.
- (6) Si le pourcentage d'échos identifiés ou de leur surface est assez représentatif (au moins 10%, mais pas plus que 100%), on va au pas no. (8); sinon on modifie les critères d'identification, notamment en alternance DIST ou DINERT et DANGLE, de façon à ce qu'ils soient augmentés en cas d'un cycle de choix trop exigeant et réduits en cas inverse.
- (7) Si le cycle de choix présent a donné un autre nombre d'identifications que le cycle précédent (ce qui indique notamment que l'identification précédente s'est passée différemment) et si le nombre maximal d'itérations (dix) n'a pas encore été atteint, on relance tout le cycle de couplage de nouveau avec des critères modifiés.
- (8) L'itération du couplage s'est terminée, soit à cause d'une stationnarité du nombre d'identifications soit grâce à une assez bonne identification, soit à cause de la limite imposée sur le nombre d'itérations. Si le vecteur moyen est assez représentatif (en terme de pourcentage d'échos ou de surface), les paires d'échos non-couplés dont le vecteur de déplacement est le même que le vecteur général mais dont les caractéristiques ne sont pas assez proches sont couplés; sinon l'ancien vecteur de déplacement est pris.
- (9) Le vecteur de déplacement général est recalculé en utilisant toutes les paires d'échos couplés, puis tous les vecteurs calculés, individuels ou généraux, sont stockés pour qu'on puisse par la suite les utiliser dans l'étape de prévision.

4e étape: La prévision

Chaque écho est déplacé soit par le vecteur individuel calculé dans l'étape de couplage soit par le vecteur de mouvement général en cas d'une non-identification de cet écho.

5.5. La version scout II.0

Les quatre différences les plus importantes par rapport à la version scout II sont :

- l'utilisation du couplage hiérarchique ;
- le choix d'un niveau minimum de travail ;
- l'utilisation du vent comme première estimation ;
- la modification du module de contrôle.

Pour le couplage hiérarchique, on crée pour chaque image dans l'étape (2) les échos artificiels décrits au chapitre 3.3. Rappelons que ceci se fait à l'aide d'un écart entre échos a et b qui est d'autant plus petit que leurs masses sont grandes :

$$d(a,b) = \frac{m_a + m_b}{m_a * m_b} ||c_a - c_b||^2$$

où m est la masse et
c le centre de gravité d'un écho (a ou b).

On propose pour une réunion les deux échos dont l'écart est minimal et on crée alors à la place des deux échos a et b un écho $e = a \cup b$. La répétition de ce processus avec e à la place de a et b donne comme résultat la hiérarchie mentionnée au chapitre 3.

Le calcul des caractéristiques d'un nouvel écho $e = a \cup b$, qui est aussi effectué dans l'étape (2), est très rapide en utilisant les formules suivantes :

- * la taille $t_e = t_a + t_b$
- * la masse $m_e = m_a + m_b$
- * le centre de gravité $c_e = \frac{m_a}{m_e} c_a + \frac{m_b}{m_e} c_b$
- * l'ancien mouvement $v_e = \frac{m_a}{m_e} v_a + \frac{m_b}{m_e} v_b$

- * l'inertie de X et de Y

$$I_e = I_a + I_b + \frac{m_a * m_b}{m_a + m_b} ||x_a - x_b||^2$$

* l'inertie de X*Y

$$J_e = J_a + J_b + \frac{m_a * m_b}{m_a + m_b} ||x_a - x_b|| ||y_a - y_b||$$

L'utilisation d'échos imaginaires nécessite aussi des contrôles supplémentaires dans l'étape (3) qui empêchent qu'on couple des échos qui font partie d'un écho déjà couplé (montré en rectangle dans la figure 5.5). Pour ne pas perdre l'information dans une telle situation, il y a un transfert d'information après le couplage qui donne le vecteur de déplacement et le facteur de croissance aux échos qui sont les sous-ensembles de l'écho couplé. Selon le poids de l'écho, on transfère aussi cette information vers les échos plus hauts dans l'arbre (figure 5.5).

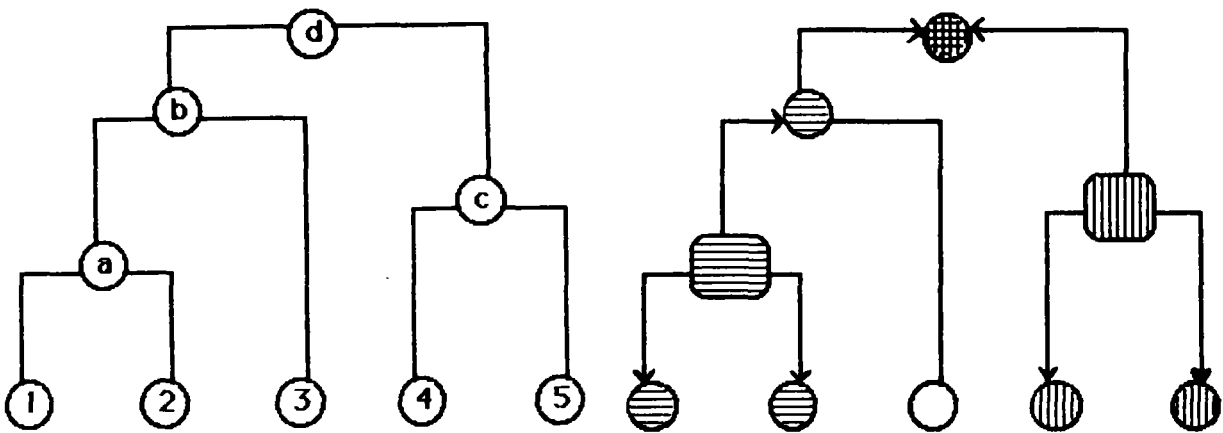


Figure 5.5: L'héritage des caractéristiques historiques dans l'arbre binaire

Le choix d'un niveau de pluie se fait de la manière décrite au chapitre 4.3.2. Après la lecture de l'image, on définit le niveau adéquat sur lequel on travaille par la suite.

Pour éviter des changements nombreux en taille et masse, dûs à la sélection d'un niveau différent à chaque nouveau pas de temps, on conserve le même niveau jusqu'au moment où on arrive soit à moins de 500 pixels, soit à plus de 2500 pixels à manipuler.

Une autre modification touche l'étape (4) de prévision. Avec la méthode qui ignore les pixels au-dessous d'un certain niveau, il faut déplacer ceux-ci par le mouvement général pour garantir un suivi des faibles intensités. Ensuite, on procède à la prévision habituelle où on déplace chaque écho individuellement.

La force et la direction du vent comme estimation initiale aident considérablement le premier passage de l'algorithme : sans elles, le vecteur de départ est (0,0) et cela ralentit souvent la découverte de la bonne direction de déplacement des échos.

Plusieurs modifications du module de contrôle (étape (3)) ont été nécessaires. A part celles qui étaient entraînées par l'adaptation du couplage hiérarchique, nous nous sommes aperçus que la variation du vecteur de déplacement est un critère de contrôle plus "parlant" que le nombre de bons couplages effectués. Nous l'avons donc introduite pour accepter ou refuser un couplage. Par rapport au schéma 5.4, on modifie les pas suivants:

- (3) les couplages loin de la trajectoire générale (en fonction de la variabilité de celle-ci) sont éliminés.
- (3a) les couplages où l'un des échos se trouve au bord de l'image sont éliminés.
- (5) si les écarts entre v_t et v_{t-1} sont trop grands (en fonction de la variabilité du vecteur moyen), v_t est négligé et v_{t-1} pris à sa place.

5.6. La version scout II.c

Cette version est restée à l'état d'essai et elle n'a pas fait l'objet d'une mise au point complète. Elle est semblable à scout II.0 avec en plus la possibilité de changement en taille et intensité des échos. On déduit pour chaque couple d'échos, obtenu pendant le couplage (étape (3)) les facteurs de croissance en taille et en intensité. Ces facteurs sont stockés pour une éventuelle utilisation dans l'étape (4), la prévision.

Si dans l'étape de prévision le facteur de croissance actuel et le facteur de croissance de l'écho au pas de temps avant ont la même tendance, deux fois de suite une croissance ou deux fois une diminution, on considère ce développement comme fiable.

Pour la prévision, on extrapole la moyenne arithmétique des deux valeurs de croissance en taille pour une prévision de l'élargissement et celle des deux valeurs de croissance en intensité pour une prévision de l'intensification d'un écho.

Parce que le cycle de vie d'un écho ne suit pas une tendance constante pendant longtemps comme l'ont montré plusieurs études (cf. chapitre 4), on n'extrapole pas au-delà de 15 minutes. Cette approche pose déjà sans étude profonde des questions suivantes :

- quel est l'horizon d'une telle prévision convective ?
- dans quelles situations météorologiques peut-on l'appliquer ?
- quelles sont les modélisations ayant à la fois une signification météorologique et hydrologique ?

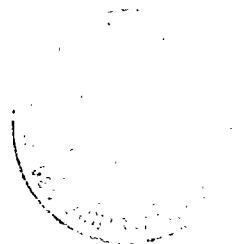
Tant que les réponses à ses questions ne sont pas données, cette version et toute modélisation de croissance et décroissance reste à un stade de mise au point.

Pour la prévision, on extrapole la moyenne arithmétique des deux valeurs de croissance en taille pour une prévision de l'élargissement et celle des deux valeurs de croissance en intensité pour une prévision de l'intensification d'un écho.

Parce que le cycle de vie d'un écho ne suit pas une tendance constante pendant longtemps comme l'ont montré plusieurs études (cf. chapitre 4), on n'extrapole pas au-delà de 15 minutes. Cette approche pose déjà sans étude profonde des questions suivantes :

- quel est l'horizon d'une telle prévision convective ?
- dans quelles situations météorologiques peut-on l'appliquer ?
- quelles sont les modélisations ayant à la fois une signification météorologique et hydrologique ?

Tant que les réponses à ses questions ne sont pas données, cette version et toute modélisation de croissance et décroissance reste à un stade de mise au point.



CHAPITRE 6

L'ECHANTILLON TEST



6.1. Origine des données

Les données de cette étude ont été fournies par la Météorologie Nationale (Magny-les-Hameaux) où elles ont été sélectionnées par Thierry Denoeux au début de sa thèse (Denoeux, 1986a).

Il s'agit des images (400 km x 400 km) du radar de Trappes (qui est un radar C-band : longueur d'onde 5,6 cm). Elles ont été archivées en général toutes les 15 minutes. La dimension des images est de 256 x 256 points (pixels de 1.6 x 1.6 km). Les valeurs de réflectivité qu'on utilise, sont linéairement discrétisées en 16 niveaux (tableau 6.1). L'échelle des intensités est alors logarithmique. Pour l'instant, on peut travailler sur 1068 images qui représentent 43 événements sur 49 jours des années 1984 et 1985. D'autres informations sur les données se trouvent dans Denoeux (1986a et b) et les détails techniques de leur utilisation dans l'annexe 3.

| Niveau | Réflectivité (dBZ) | Intensité (mm/h) |
|--------|-----------------------|---------------------|
| 0 | 0 - 13 | 0.00 - 0.23 |
| 1 | 13 - 16 | 0.23 - 0.36 |
| 2 | 16 - 20 | 0.36 - 0.65 |
| 3 | 20 - 24 | 0.65 - 1.15 |
| 4 | 24 - 28 | 1.15 - 2.05 |
| 5 | 28 - 32 | 2.05 - 3.65 |
| 6 | 32 - 36 | 3.65 - 6.48 |
| 7 | 36 - 40 | 6.48 - 11.5 |
| 8 | 40 - 44 | 11.5 - 20.5 |
| 9 | 44 - 48 | 20.5 - 36.5 |
| 10 | 48 - 52 | 36.5 - 64.8 |
| 11 | 52 - 56 | 64.8 - 115.3 |
| 12 | 56 - 60 | 115.3 - 205.1 |
| 13 | 60 - 64 | 205.1 - 364.6 |
| 14 | 64 - 68 | 364.6 - 648.4 |
| 15 | 68 - 72 | 648.4 - +∞ |

Tableau 6.1: Niveaux de discrétisation (d'après Denoeux, 1986b)

6.2. Défauts

Malgré la sélection minutieuse, quelques petits défauts subsistaient: (cf. l'exemple suivant): ils ont été corrigés au cours de l'analyse des données.

L'analyse de l'événement du 13 juillet 1984 se base sur la performance de la méthode scout II, mesurée par le critère de corrélation croisée. La courbe associée montre un "trou" de performance pour le neuvième et le dixième pas de temps (fig. 6.1), ce qui est équivalent à 11:15 et 11:30 heures respectivement.

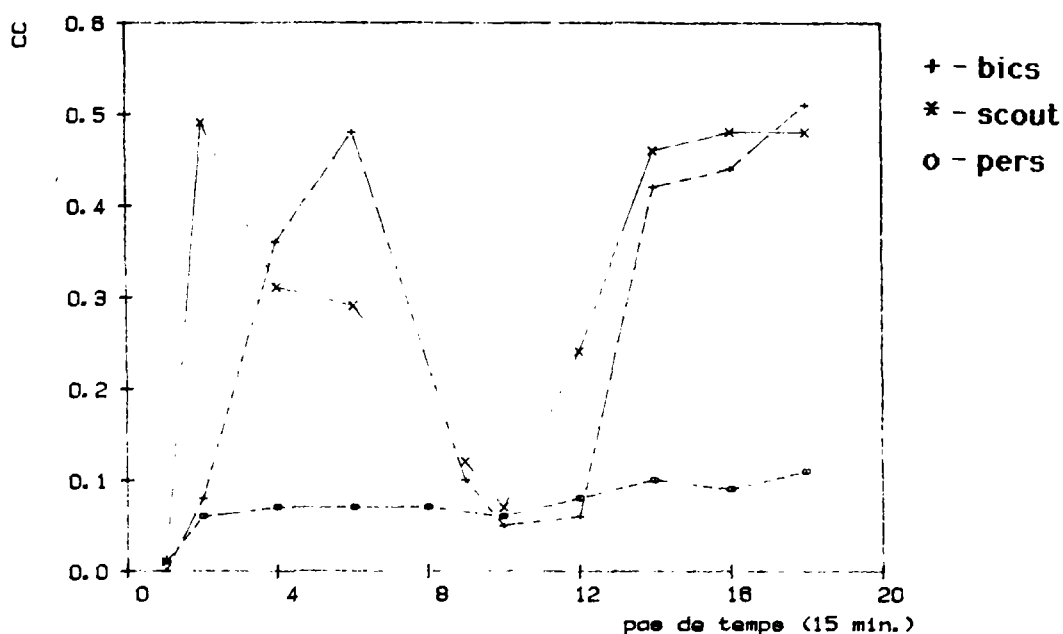


Figure 6.1: Le "trou" de performance

Le protocole de prévision montre qu'on obtient un déplacement moyen des échos entre 10:30 et 11:15 qui est de (15,-1) unités, soit (20,-4) unités par heure. Dans l'intervalle suivant, entre 11:15 et 11:30, on observe un vecteur de (16,-1) unités, soit (64,-4) unités par heure. En connaissant le mouvement moyen pendant l'évènement qui est de l'ordre de (27,-1) unités par heure, le premier soupçon d'une erreur dans l'heure d'enregistrement s'est confirmé.

Une correction de l'heure d'enregistrement de l'image de 11:15 à 11:00 nous a donné un résultat beaucoup plus satisfaisant (fig. 6.2).

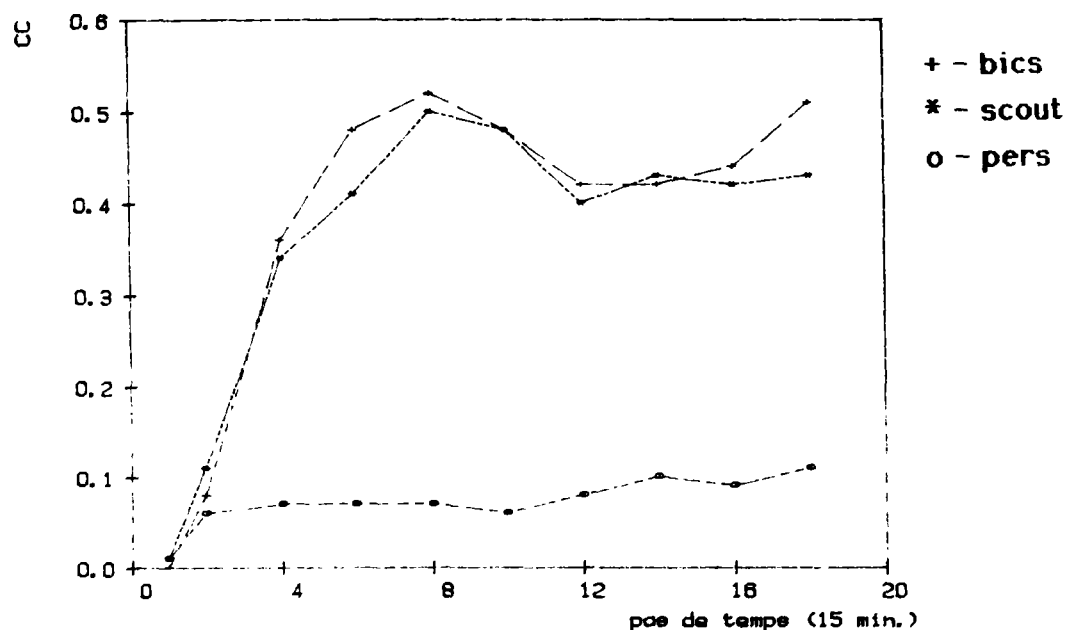


Figure 6.2: Résultats après correction

On aurait également détecté ce défaut en utilisant un autre critère comme par exemple le vecteur de déplacement.

A l'exception de quelques rares corrections de ce type, il ne paraissait pas y avoir de défauts majeurs dans notre échantillon de données.

6.3. Caractéristiques de sept événements étudiés en détail

Pour un premier test détaillé et pour le développement du modèle, nous avons sélectionné 94 images de sept événements. Nous les avons choisis pour disposer d'une grande variété en caractéristiques météorologiques entre différents événements. Ils ont une durée comprise entre 1:15 et 6:00 heures, enregistrés normalement avec des pas de temps de 15 minutes. Il y a quelques cas de pas de temps de 30 minutes, voire 60 minutes (cf. tableau 6.2).

Les images radar présentées dans le texte sont réduites verticalement par le facteur 4 et horizontalement par le facteur 2. Un pixel visualisé représente alors la moyenne des huit pixels dont il prend la place.

| Date | N° images | N° $\Delta t =$ 15mn | N° moyen d'échos | durée | taille d'échos moyenne (pix) | vent | situation météo |
|----------|--------------|----------------------------|------------------------|-------|---------------------------------------|-----------|---|
| 21/6/84 | 6 | 5 | 20 | 1h15 | 50 | 20 km/h | front froid, bande |
| 13/7/84 | 12 | 1 | 50 | 5h45 | 25 | (65 km/h) | instabilité |
| 5/9/84 | 23 | 22 | 65 | 5h30 | 20 | 25 km/h | traîne, instabilité croissante |
| 10/9/84 | 6 | 4 | 70 | 1h30 | 30 | (65 km/h) | traîne, forte instabilité |
| 1/10/84 | 7 | 5 | 14 | 1h45 | 1500 | 50 km/h | front chaud, bande large |
| 24/10/84 | 25 | 24 | 20 | 6h00 | 60 | 55 km/h | front chaud, zones de précipitation |
| 8/11/84 | 15 | 12 | 9 | 4h00 | 900 | 90 km/h | front froid, ligne de convection |

(les valeurs entre parenthèses sont sujettes à caution)
 (Δt = pas de temps des mesures)

Tableau 6.2 : Caractéristiques des séquences choisies

Le 21 juin 1984 :

Cette suite d'images est la plus courte avec une durée de 75 minutes ou 6 images à intervalle de 15 minutes chacune. La situation documentée est une bande d'un front froid qui graduellement sort de l'image (fig. 6.3). Il y a peu d'échos sur l'image, qui est dominée par le dit front. Le vent mesuré par le radiosondage est d'environ 20 km/h.

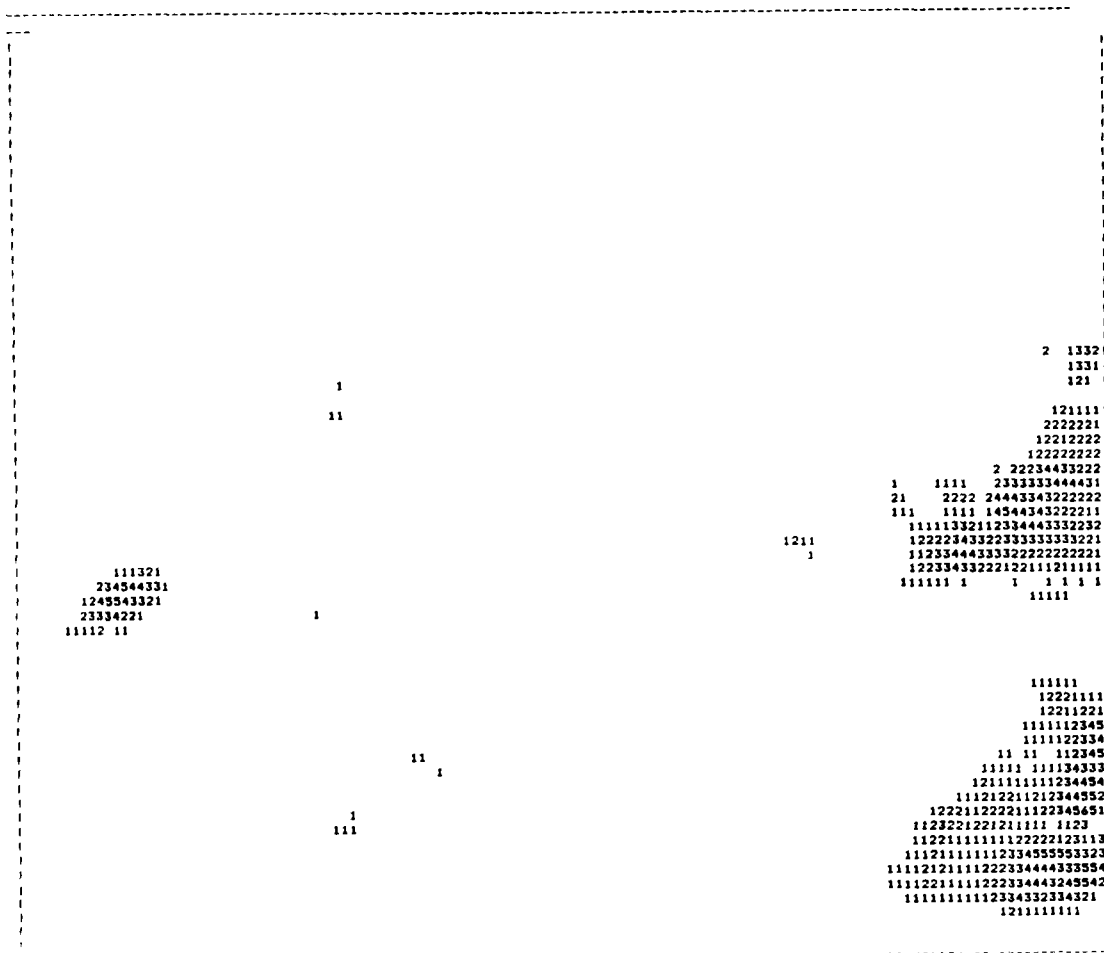
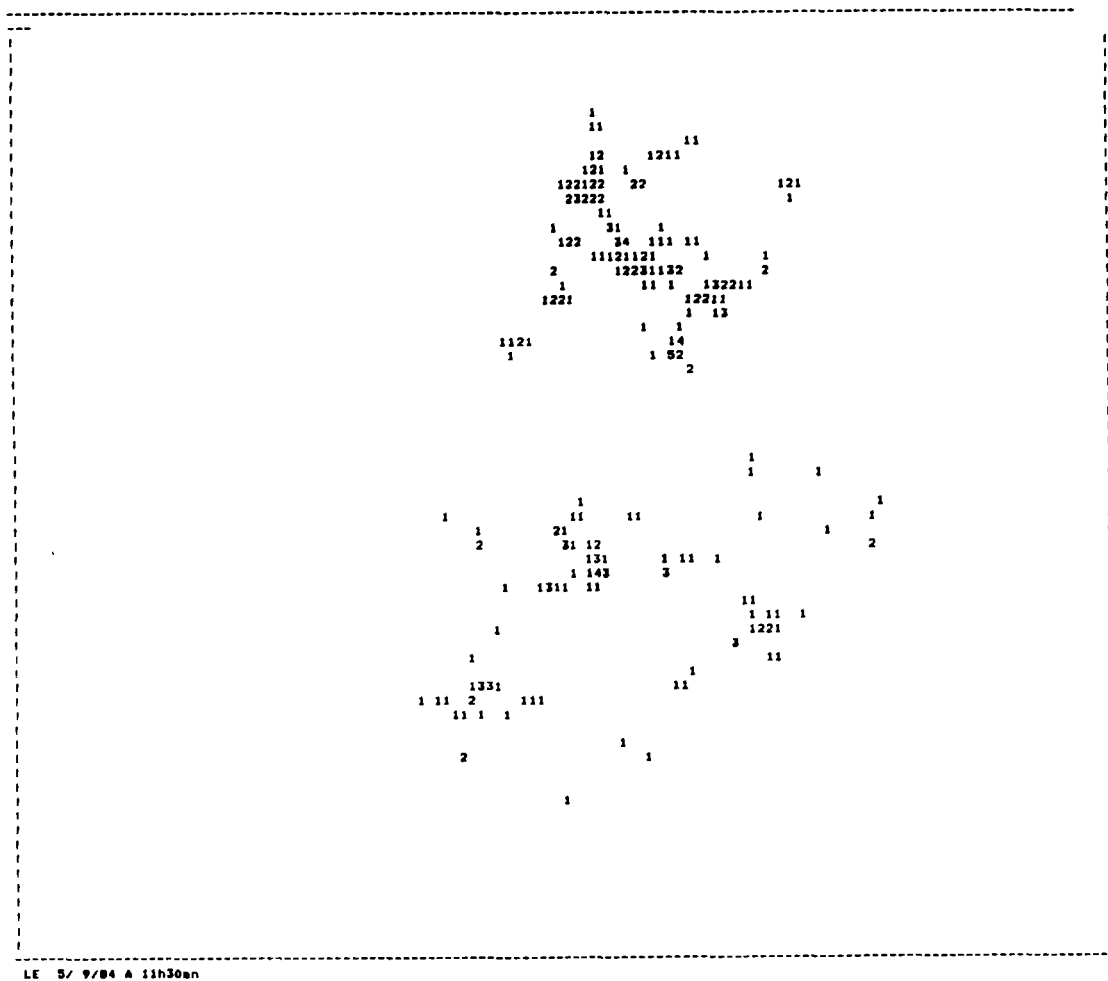


Figure 6.3: Le 21 juin 1984

Le 5 septembre 1984 :

L'événement, d'une durée de 5:30 heures, se constitue de 23 images, séparées de 15 minutes chaque fois. Dû à une augmentation de l'instabilité, on a pu observer que le nombre d'échos croissait de 40 à 80 (fig. 6.5). Le vent est très faible (25 km/h).

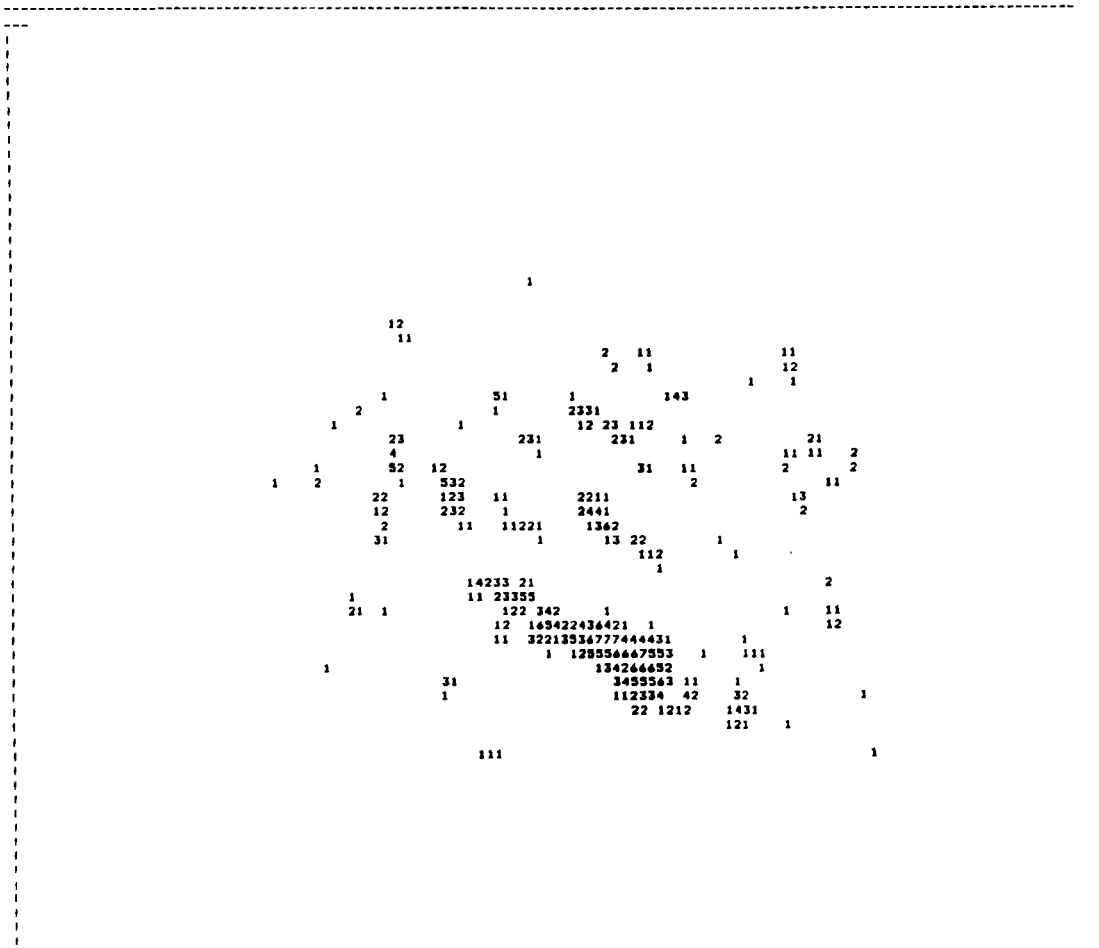


LE 5/ 9/84 A 11h30an

Figure 6.5: Le 5 septembre 1984

Le 10 septembre 1984 :

Sur les images de cet événement, on distingue nettement le changement des formes, changement en taille et intensité des échos, dû à l'instabilité importante. Malheureusement, il y a une fois un pas de temps de 30 minutes entre deux de ces 6 images, ce qui empêche un suivi permanent des effets convectifs. Le nombre d'échos est très élevé avec 70 échos en moyenne par image (fig. 6.6). La vitesse du vent est de 65 km/h.



Le 1er octobre 1984 :

Les sept images sont toutes caractérisées par une forte influence du bord de l'image. La séquence, d'une durée de 1:45 heures, montre un faible nombre d'échos (20) dont un domine nettement l'image (fig. 6.7) : il s'agit de la bande large d'un front chaud. Les mesures du radiosondage ont donné un vent de 50 km/h.



LE 1/10/84 A 9h 00m

Figure 6.7: Le 1 octobre 1984

Le 24 octobre 1984 :

Ce front chaud se constitue de zones de précipitation intense, on n'observe pas de bande (fig. 6.8). Nous disposons d'une suite de 25 images à un pas de temps égal à 15 minutes, sur lesquelles il y a en moyenne une vingtaine d'échos. La durée de cet événement est de 6 heures, et le vent souffle avec la même force que le 1er octobre, 55 km/h.

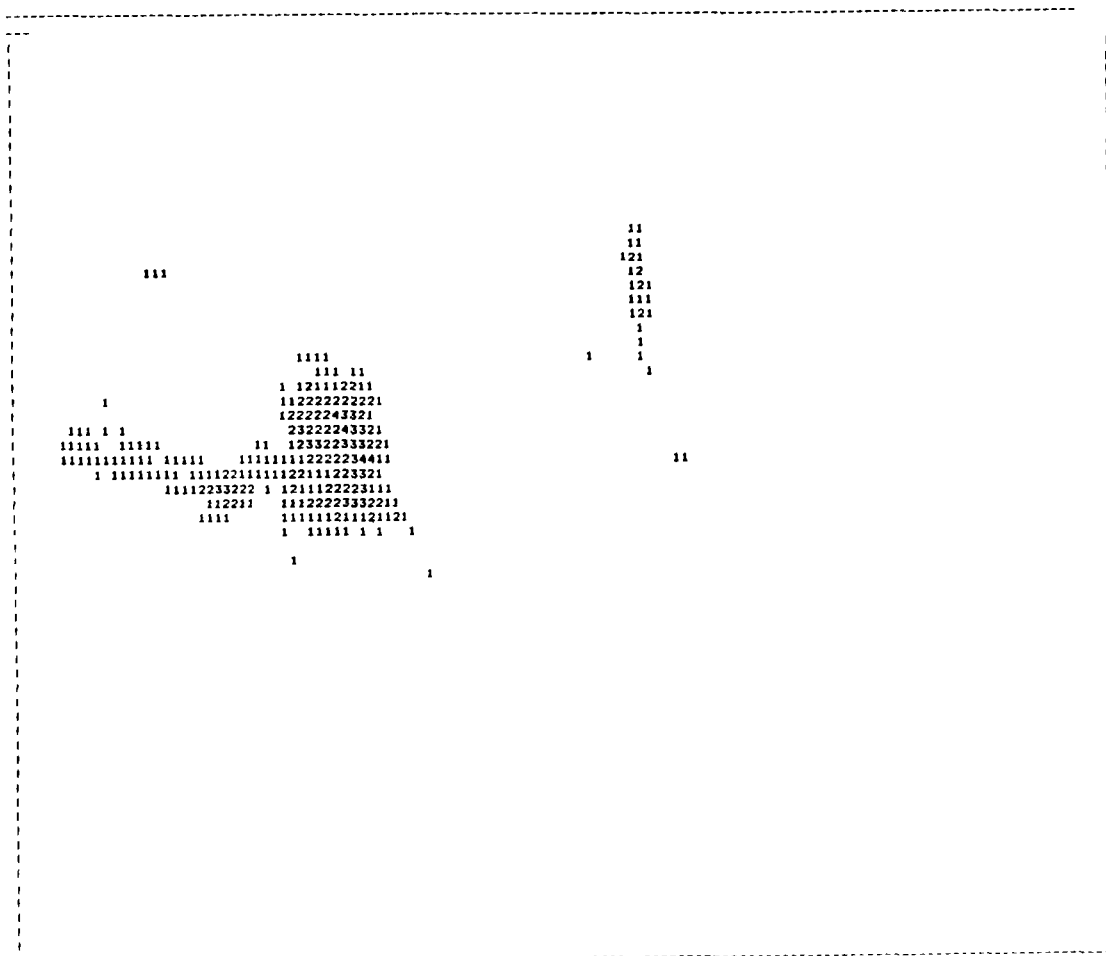
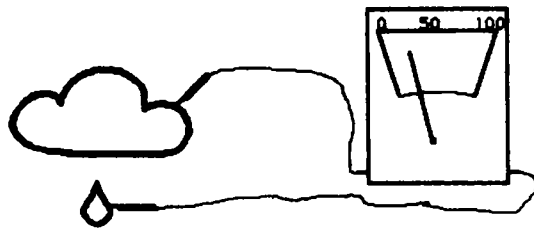


Figure 6.8: Le 24 octobre 1984

CHAPITRE 7

CRITERES DE PERFORMANCE



On a besoin de critères de qualité pour pouvoir comparer plusieurs méthodes de prévision. Ce chapitre décrit la sélection a priori de certains d'entre eux, mais une recherche plus approfondie sur les critères de qualité les mieux adaptées à l'hydrologie urbaine est actuellement en cours au CERGNE (thèse de Thierry Denoeux devant se terminer en 1988). Nous avons d'abord étudié quelques paramètres traditionnels, comme le CSI (Critical Success Index), le RI (indice Rousseau) et le coefficient de corrélation croisée. Mais comme ces critères ont paru insuffisants pour une utilisation hydrologique, nous avons proposé une paire de critères hydrologiques.

Toutefois, l'ensemble de ces critères n'est pas toujours d'une grande sensibilité et il est apparu nécessaire de proposer des critères de qualité plus proches des méthodes utilisées comme

- la variabilité du vecteur de déplacement,
- le nombre d'échos reconnus pour les méthodes de reconnaissance des échos,
- la vitesse de calcul.

L'échéance de prévision correspond à l'image suivante, en général elle est de 15 mn, dans certains cas exceptionnels, 30, 45 ou 60 mn. Avec un temps de réaction du réseau d'assainissement de 30 à 45 mn, on arrive ainsi à doubler le temps d'alerte et de gestion de ce réseau.

7.1. CSI, RI et coefficient de corrélation croisée

La météorologie s'est toujours intéressée aux critères qui permettent de quantifier la qualité d'une prévision. Les météorologues ont alors créé des paramètres liés au tableau de contingence (tabl. 7.1).

On calcule alors le "Critical Success Index" (CSI), utilisé par un grand nombre de chercheurs (Elvander, 1976 ; Bellon/Austin, 1978 ; Carpenter/Owens, 1981 ; etc.) :

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}$$

l'indice de Rousseau (RI), (Rousseau, 1980 ; Ciccione/Pircher, 1984):

$$RI = \frac{4ad - (b+c)^2}{(2a+b+c)(2d+b+c)}$$

et le coefficient de corrélation croisée ("CC"; cf. Wilson, 1966 et Austin/Bellon, 1974) présentée au chapitre 4.3.1.

| prévue mesurée | pluie | non pluie |
|-------------------|-------|--------------|
| | a | b |
| pluie | | |
| non pluie | c | d |

- où
- a = nombre de pixels où la pluie a été correctement prévue
 - b = nombre de pixels où la pluie n'a pas été prévue
 - c = nombre de pixels où l'absence de pluie n'a pas été prévue
 - d = nombre de pixels où l'absence de pluie a été correctement prévue

Tableau 7.1: Tableau de contingence

Tous ces paramètres permettent de comparer les méthodes de prévision. Mais nous avons observé qu'une grande couverture de pluie dans une image augmente le taux de réussite selon ces critères, et on réduit leur sensibilité aux erreurs du vecteur de déplacement. La figure 7.1 montre que la différence en qualité de performance (CC) entre la méthode de prévision bics (o) et la méthode de prévision triviale (pers, +) diminue quand le nombre de pixels augmente. La performance est alors, selon ce critère de CC, meilleure avec des images de large couverture que de petite, malgré le fait qu'on utilise les mêmes méthodes.

Pour quantifier la qualité de la prévision en termes hydrologiques, ces trois critères ne sont pas adéquats parce qu'ils ne rendent pas compte des différences de hauteurs d'eau. Ils calculent plutôt un indice de correspondance entre les régions de l'image touchées par la pluie (le nombre de pixels ayant un poids hydrologique est en général faible par rapport au nombre total de pixels d'une image, de l'ordre de 1 pour 1000 d'après les estimations de Thierry Denoeux (dans sa thèse à paraître en 1988)).

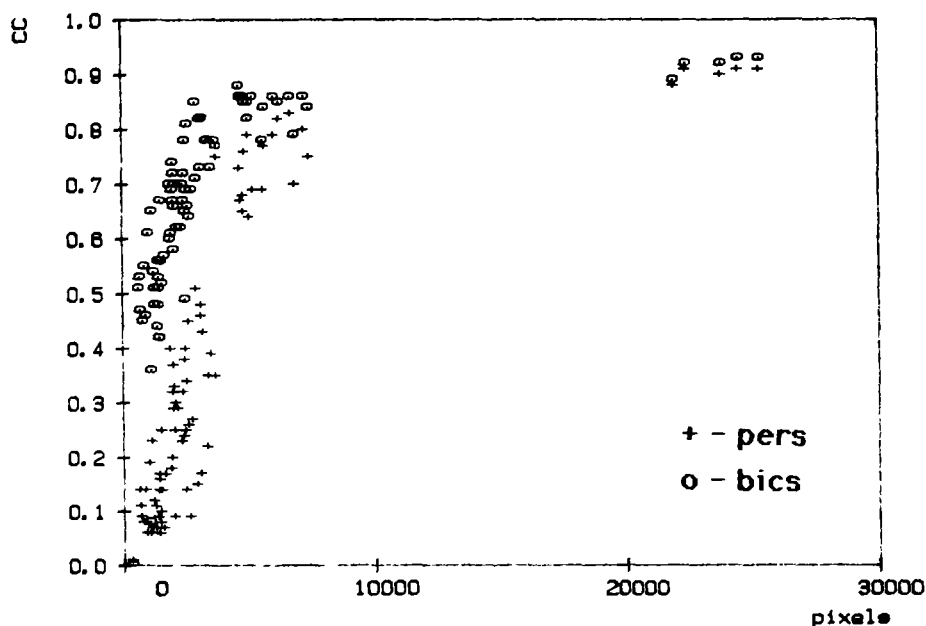


Figure 7.1: Réduction de sensibilité à la CC avec l'augmentation du nombre de pixels

7.2. Qu'est-ce qu'une bonne prévision hydrologique?

Comme évoqué ci-dessus, cette question fait l'objet d'une recherche concomitante au CERGNE et nous nous contentons de l'effleurer.

On est tenté de dire qu'une bonne prévision est une prévision qui prévoit ce qui se passe en réalité. C'est exact.

Mais on n'a pas de connaissance de la réalité puisqu'on dispose de mesures radar, de mesures des pluviomètres, des mesures dans le réseau d'assainissement, et ces mesures ne sont pas la réalité. Elles s'en approchent seulement.

Pour comparer la qualité des méthodes de prévision radar, quelle est le critère approprié de comparaison?

Sans doute, est-ce la hauteur d'eau dans le réseau qui nous intéresse le plus. Mais, si on compare dans le réseau les hauteurs d'eau prévues et réelles, on est obligé de passer par l'intermédiaire d'un modèle hydrologique, qui éventuellement modifie considérablement la répartition des pluies tombées. C'est donc un critère trop éloigné, bien que sa connaissance soit le but final pour l'implantation sur le système de gestion automatisée du département de Seine-Saint-Denis.

Il faut donc utiliser la lame d'eau tombée sur un bassin versant, mais faut-il la mesurer avec des pluviographes ou avec le radar, c'est très discutable (cf. Collier, 1986b et références dans son article). Ce qui est sûr, c'est que le radar et le pluviographe ne mesurent ni le même phénomène (réflectivité/intensité), ni de la même manière (volumétrique/ponctuelle). Nous ne voulons pas inclure cette discussion dans la présentation de nos résultats.

Cette lame d'eau de contrôle sera supposément calculée à l'aide de l'image radar mesurée à l'échéance de la prévision.

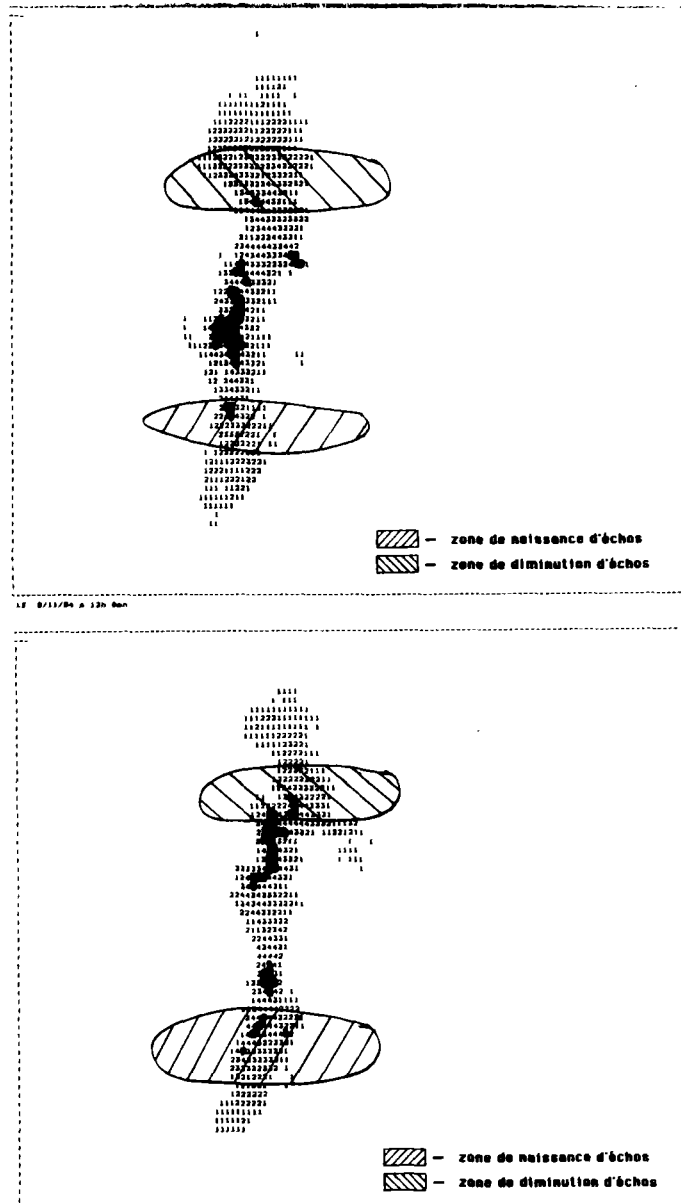


Figure 7.2: Régions de sur- et de sous-estimation, 8/11/84

Avec ce critère d'évaluation, il reste des erreurs de mesures qui posent des problèmes pour la vérification de la prévision. Il s'agit principalement de l'influence de la distance qui fait qu'on trouve des "frontières" sur l'image qui changent formes, lieux et vitesses des échos.

Regardons les images du 8/11/84 dans la figure 7.2. On remarque facilement qu'au-delà d'une certaine distance du radar (au milieu de l'image), il n'y a plus d'échos intenses. Or, il y en a qui arrivent brusquement dans une zone d'environ 150 km autour du radar sans être visibles auparavant. Cela fait qu'on observe des déplacements des centres de gravités des échos (en foncé) qui ne correspondent pas avec le mouvement des mêmes échos ou du déplacement de la forme entière (en gris).

Puisque les échos se déplacent du sud au nord, on sous-estime toujours dans le sud et on surestime toujours dans le nord, si on compare l'image prévue et l'image mesurée.

Pour une prévision il se pose la question du choix entre l'extrapolation du mouvement faux des centres intenses (ce qui améliore le taux de bonnes estimations image prévue / image mesurée) et du mouvement réel (ce qui entraîne les sur- et sous-estimations décrites, mais qui garantit en réalité une meilleure estimation).

Malgré les problèmes de vérification entraînés, nous nous sommes décidés à utiliser la deuxième approche qui forcément diminue la performance mesurée en critères basés sur la comparaison image prévue / image mesurée.

Il faut remarquer qu'on ne peut pas simplement appliquer un facteur de correction tenant compte de la distance puisqu'il y a des événements sans influence quantitative de la frontière de l'image (par exemple, le 21/6/84, figure 6.3.).

7.3. Un critère hydrologique

Pour quantifier les conséquences d'une prévision donnée pour la gestion d'un réseau d'assainissement (cf. chap. 9), il faut distinguer entre sous-estimations et surestimations de la situation réelle. Nous nous sommes rendus compte (Denoeux, 1988) qu'une sous-estimation est plus grave qu'une sur-estimation du même degré. Lorsqu'une sous-estimation de 50% peut être critique, une surestimation de 100% laisse encore en général des marges de manoeuvre.

Nous avons alors conçu une paire de critères avec quatre propriétés importantes :

- ils distinguent entre sur- et sous-estimations,
- ils ne concernent que les quantités d'eau significatives pour la gestion d'un réseau (déversement direct en rivière au moindre ruissellement comme débordement exceptionnel sur la chaussée);
- ils utilisent les intensités à la place de réflectivités ;
- ils sont calculés sur une surface et non point par point.

Le critère, baptisé dHS (différence en hauteur d'eau sur une surface) se calcule de la manière suivante :

- (1) à l'intérieur d'une fenêtre centrée sur le radar de 200 km de côté, on sélectionne tous les points où la moyenne des précipitations sur le 8-voisinage et le point lui-même est d'au moins un millimètre par heure (fig. 7.4).

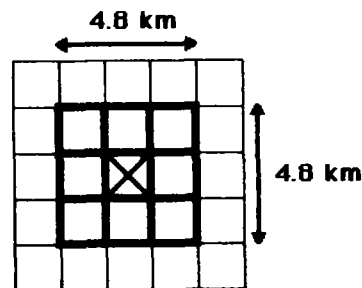


Figure 7.4: Le masque de surface

- (2) pour ces points: on calcule la différence entre les moyennes prévues et mesurées sur les 9 pixels du masque de surface : $dH(i) = P_9(i) - M_9(i)$.
- (3) on calcule la moyenne de cette série de $dH(i)$ qu'on sépare en sous- (dHS-) et sur-estimations (dHS+), et la moyenne (dHS):

$$dHS+ = \frac{1}{|I_+|} \sum_{i \in I_+} dH(i) \quad , (dH(i) > 0)$$

$$dHS- = \frac{1}{|I_-|} \sum_{i \in I_-} dH(i) \quad , (dH(i) \leq 0)$$

$$dHS = \frac{1}{|I|} \sum_{i \in I} dH(i)$$

$$\text{avec} \quad \begin{aligned} I_+ &= \text{card}(dH(i) > 0, i \in I) \\ I_- &= \text{card}(dH(i) \leq 0, i \in I) \end{aligned}$$

Le critère $dHS+$ indique alors l'importance d'une sur-estimation, et $dHS-$ celle d'une sous-estimation (fig. 7.3). Les deux critères sont exprimés en millimètres par heure et on peut donc exploiter ces résultats selon l'importance relative d'une sous- et une sur-estimation. Le paramètre dHS (en pointillé) sert à comparer l'importance de ces niveaux.

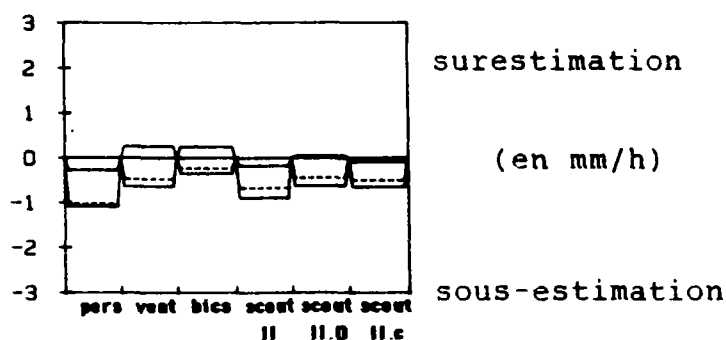


Figure 7.3: Le critère dHS

7.4. Le vecteur de déplacement prévu

Nous avons constaté que la vitesse et la direction des champs pluvieux restent relativement constantes aux échéances inférieures à l'heure. En utilisant cette information, on peut déjà vérifier la fiabilité des prévisions. Une suite de prévisions similaire à celle de la figure 7.4(o), l'exemple discuté dans 7.2., ne constitue pas une série de bonnes prévisions car il est peu vraisemblable que se produisent de tels sauts du vent réel. De plus il faut que la vitesse et la direction du déplacement ne soient pas trop différentes du dernier radiosondage (sauf en cas de passage d'un front).

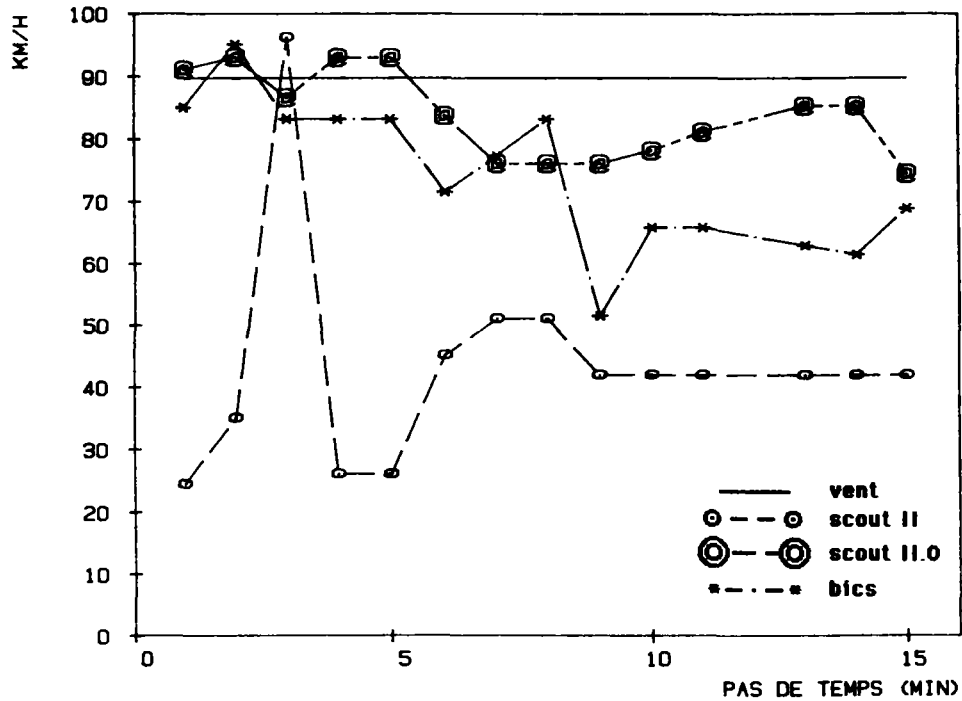


Figure 7.4: Exemple d'une mauvaise prévision(o)

7.5. Le temps de calcul

Le temps de calcul sera un critère d'élimination des méthodes de reconnaissance des formes trop lentes. Comme nous l'avons déjà indiqué dans 4.3.1., notre implantation de la corrélation croisée n'est pas la plus rapide, et donc on ne compare pas le temps de calcul de cette méthode avec celui des autres.

Nous rappelons que l'objectif temporel est de toujours rester au dessous de la barre de 60 secondes de temps CPU.

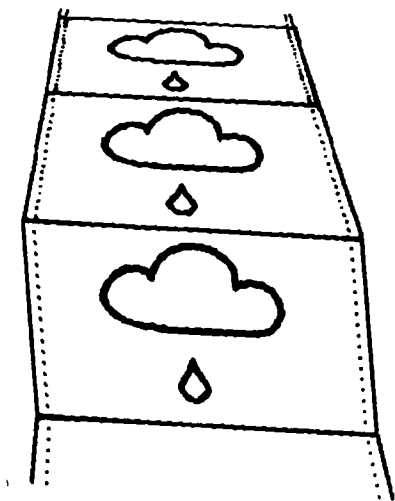
7.6. Autres critères

Naturellement, on pourrait retenir bien d'autres critères. Par exemple, le critère intuitif du bon nombre de couplages d'échos, qui sera de temps en temps cité. Par ailleurs, une autre recherche est en cours au CERGNE pour quantifier la qualité d'une prévision en fonction des coûts de fonctionnement du réseau d'assainissement. Cette étude exploite un modèle d'optimisation et de simulation et propose un critère original, s'approchant de la notion de continuité d'images radar (Denoeux, 1988).

Elle porte sur de plus longues échéances (60 - 120 minutes) et la méthode scout II.0 mise au point ici y sera évaluée sur un échantillon plus important. Outre la mise au point de la méthode, nous avons facilité cette recherche en fournissant les paramètres historiques des échos. Pour notre étude ayant pour objectif la mise au point d'une méthode, ce point est secondaire, puisqu'on améliore déjà considérablement l'information disponible pour une gestion automatisée par une prévision portant sur une échéance de 30 minutes (RTCUDS, 1987).

CHAPITRE 8

RESULTATS



Dans cette partie, nous analyserons les prévisions réalisées avec les 6 méthodes présentées dans le chapitre 5, sur 94 images tests groupées en sept événements.

8.1. Le 21 juin 1984

La prévision des méthodes scout est perturbée par l'influence du bord, qui affecte l'écho principal de la séquence et empêche la bonne identification de son barycentre (fig. 8.1). Ceci explique aussi la variation relativement forte des vecteurs de prévision pour ces méthodes ci par rapport à la méthode bics (fig. 8.2). On constate néanmoins que tous les autres critères, déplacement moyen, corrélation croisée, indice Rousseau et le CSI sont très proches (fig. 8.3a-c). En ce qui concerne les méthodes scout II et vent, on observe qu'elles sont légèrement inférieures aux deux premières (CSI et RI). La persistance n'est pas du tout comparable aux autres méthodes.

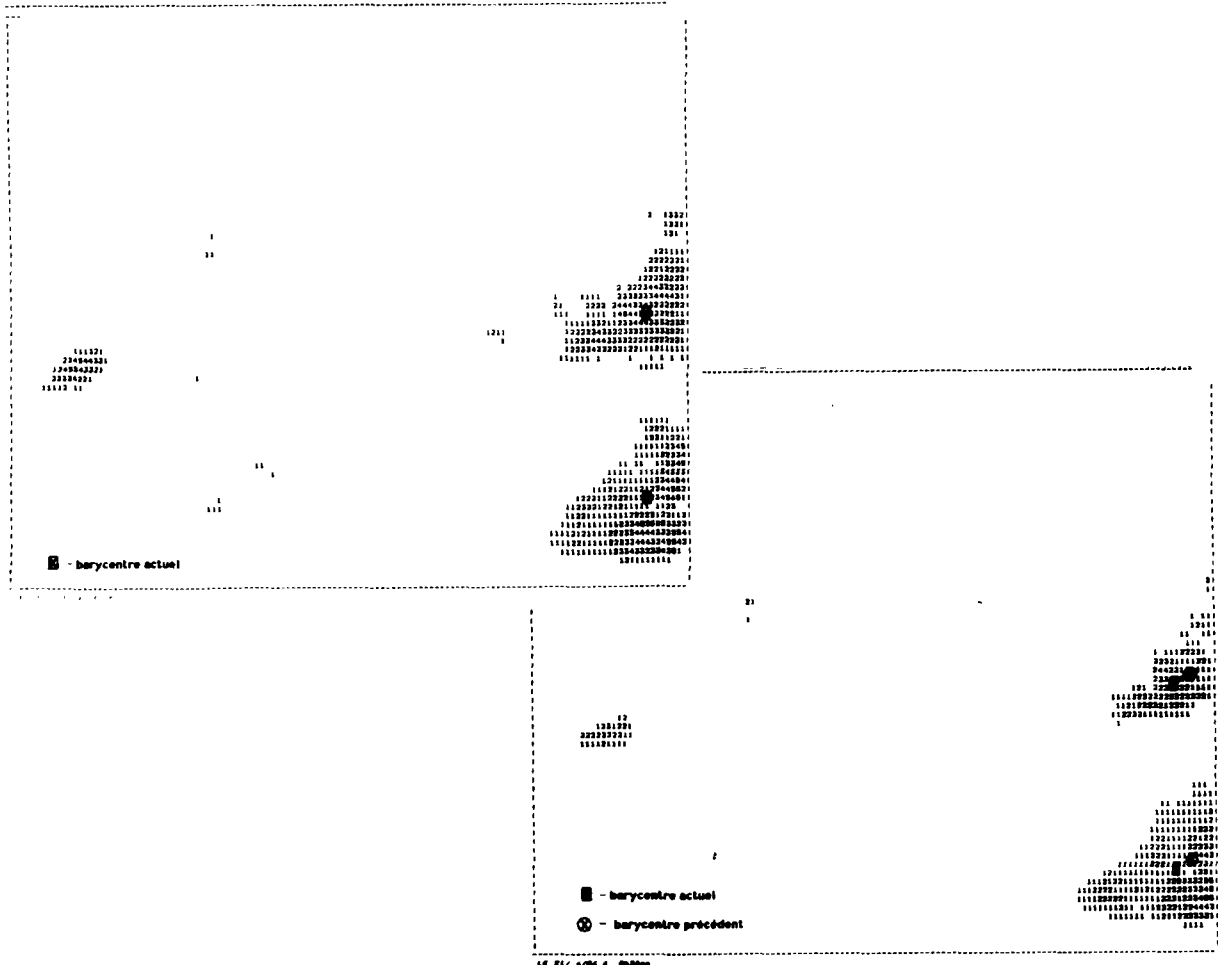


Figure 8.1: L'influence du bord sur l'écho principal

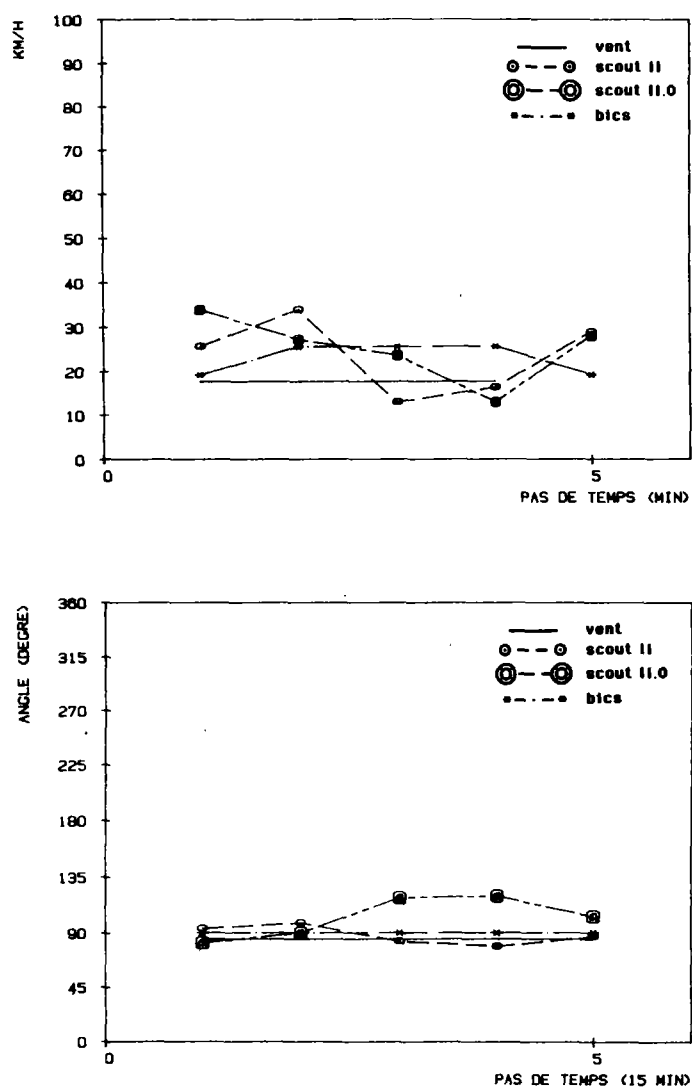


Figure 8.2: Les vecteurs de prévision 21/6/84

Parce qu'il n'y avait pas assez de points avec une forte intensité de pluie (≥ 1 mm/h) dans un rayon de 100 km autour du radar, le critère de hauteur d'eau sur une surface classe cet événement comme hydrologiquement négligeable.

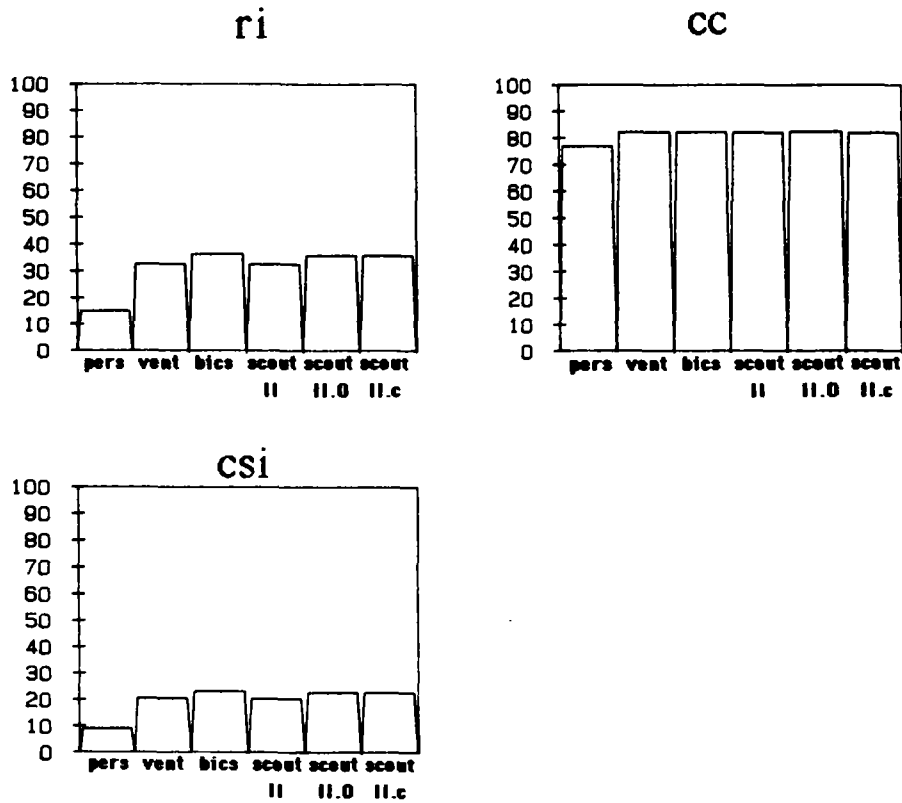


Figure 8.3a-c: Les critères classiques

Le graphique du temps de calcul montre bien le gain de la méthode affinée (scout II.0) par rapport à la méthode plus ancienne (scout II): le temps de calcul reste toujours inférieur à 45 s CPU. Auparavant, cela nécessitait en moyenne plus d'une minute avec un maximum de 100 sec (fig. 8.4).

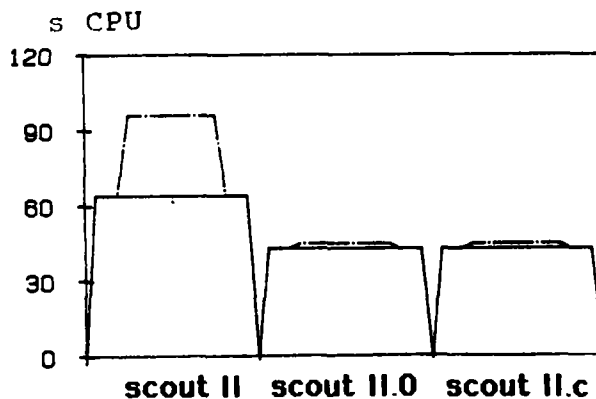


Figure 8.4 : Le temps de calcul

8.2. Le 13 juillet 1984

Dans cette situation, il est important de bien prévoir le déplacement de tous les petits échos (fig. 8.4a). Ce qui rend cette tâche encore plus difficile est l'espacement de 30 minutes en moyenne entre les images.

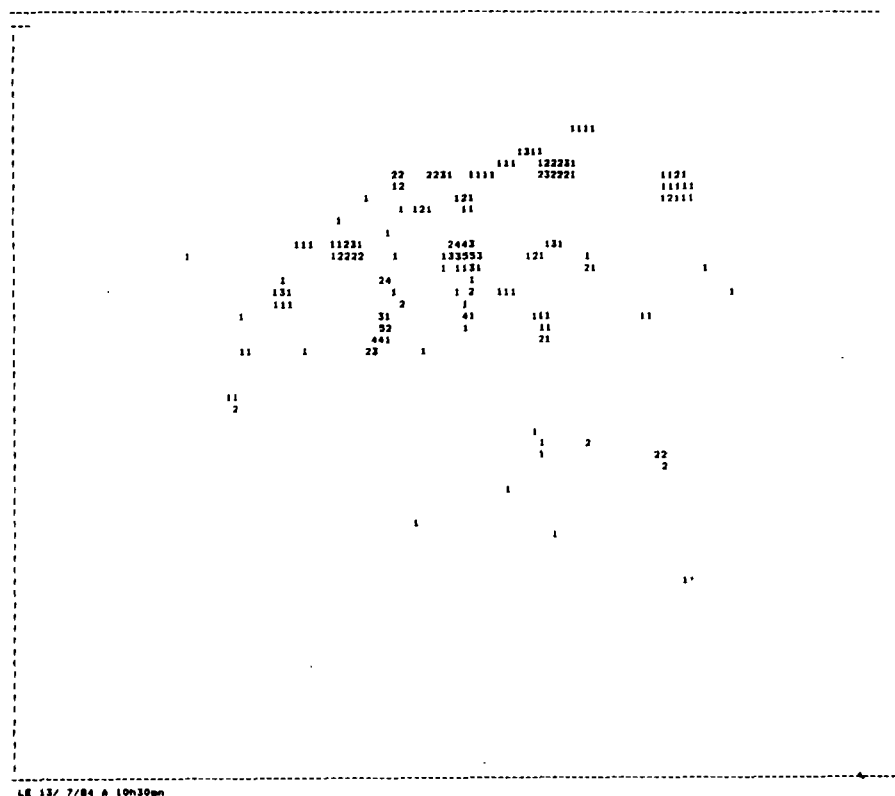


Figure 8.4a: Le 13 juillet 1984

Ainsi, c'est la méthode bics qui surestime la vitesse du vent réel, guidée par les mesures de radiosondage (fig. 8.5). Cette méthode a alors trouvé un maximum local dans son tableau de valeurs de corrélation. Signalons que la direction du déplacement n'est néanmoins pas affectée par cette mauvaise estimation.

Pour toutes les autres méthodes, la variabilité des vecteurs de déplacement reste faible et est plus proche du vent mesuré par le nouveau radiosondage effectué au cours de l'événement que du sondage de 12h avant (bics paraît très sensible à cette initialisation, la seule possible puisque la seule connue en début de l'événement). Parmi les critères "classiques", le coefficient de corrélation croisée favorise la méthode scout II, tandis que le RI et le CSI classent scout II.0 légèrement devant les autres méthodes. Les méthodes vent et pers ne sont pas assez précises pour cet événement (fig. 8.6a-c).

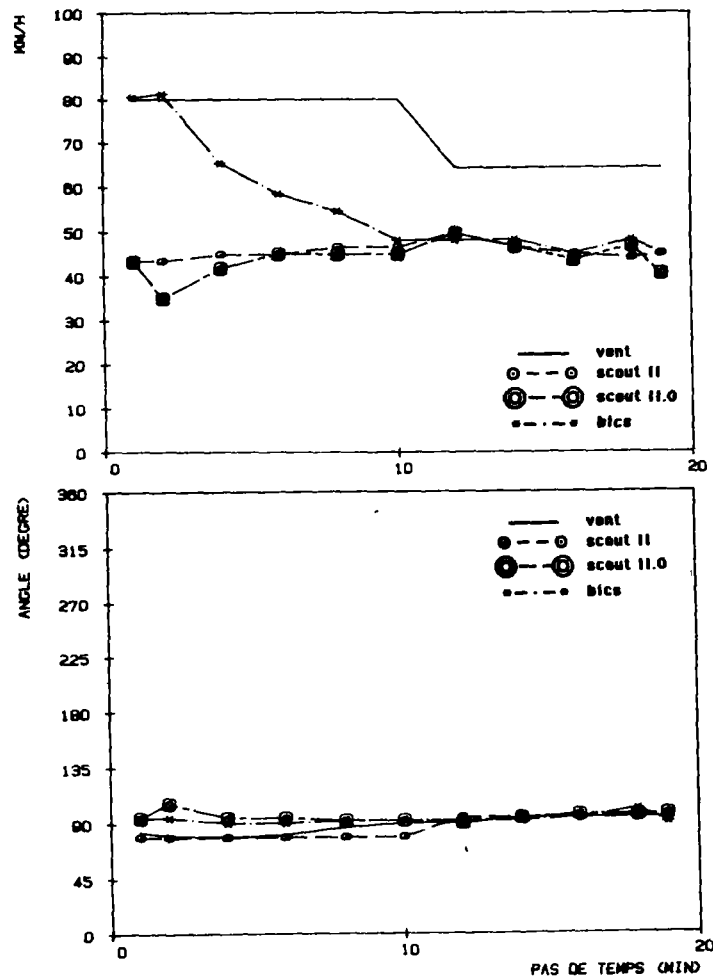


Figure 8.5 : Les vecteurs de prévision, le 13/7/84

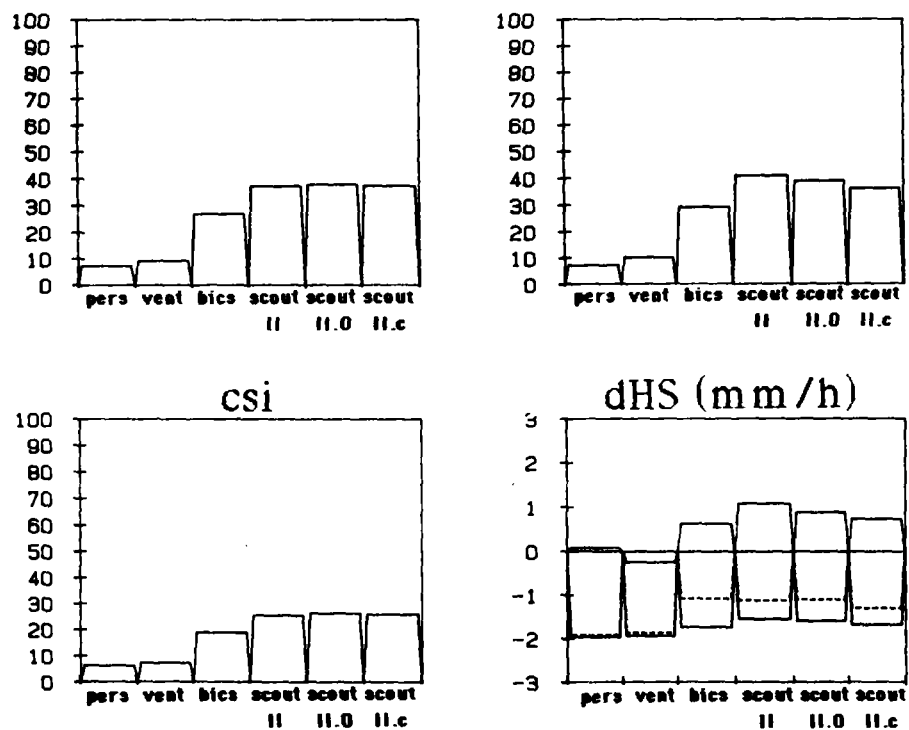


Figure 8.6a-d: Les critères de performance

La même tendance est à voir en regardant la hauteur d'eau, où bics, scout II et scout II.0 sous-estiment en moyenne de 53 à 55 % ($= 1,1$ mm/h) les pluies d'une intensité d'environ 2 mm/h (fig. 8.6d). Les méthodes scout II.c, pers et vent sous-estiment plus nettement la hauteur d'eau tombée.

Finalement, le temps de calcul des méthodes scout est plus ou moins le même (fig. 8.7) : cette fois, il n'y a pas de gain de scout II.0 vis-à-vis de scout II.

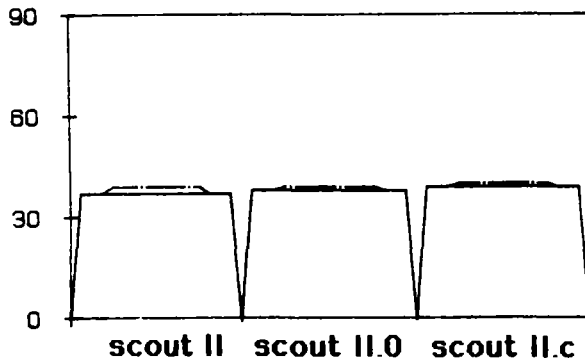


Figure 8.7 : Temps de calcul

8.3. Le 5 septembre 1984

Ayant un nombre d'échos relativement élevé (pouvant atteindre 90, fig. 8.7a), les critères de qualité réagissent sensiblement à des faibles déviations de la direction générale. Ainsi, ce sont bics et scout II.0 pour laquelle la variation du vecteur de prévision est la plus petite: ces deux méthodes sont donc moins sensibles à l'écart d'angle à l'initialisation provoqué par un sondage déjà ancien: la direction du vent, mais non sa force ont en effet changé.

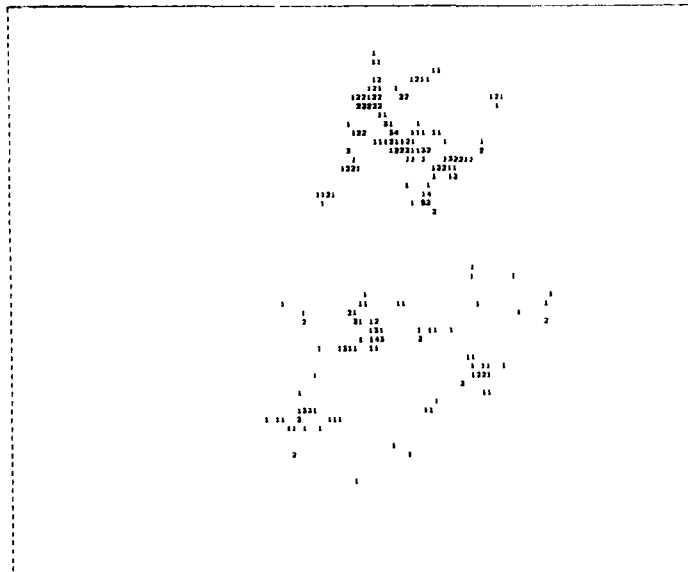


Figure 8.7a: Le 5 septembre 1984

Tous les critères, CC, CSI, RI et dHS, donnent un léger avantage à bics et scout II.0 (fig. 8.9a-d). Les performances inférieures de scout II.c (mauvaise estimation de l'évolution) et de scout II (difficultés à trouver la bonne direction (fig. 8.8)) ne sont pas hydrologiquement significatives, compte tenu du niveau moyen de pluie de 1.6 mm/h. Le vent et la persistance cependant ne donnent toutefois pas une estimation fiable.

Pour l'initialisation, toutes les méthodes scout utilisent beaucoup de temps de calcul (50 sec., fig. 8.10), mais le comportement général est le même.

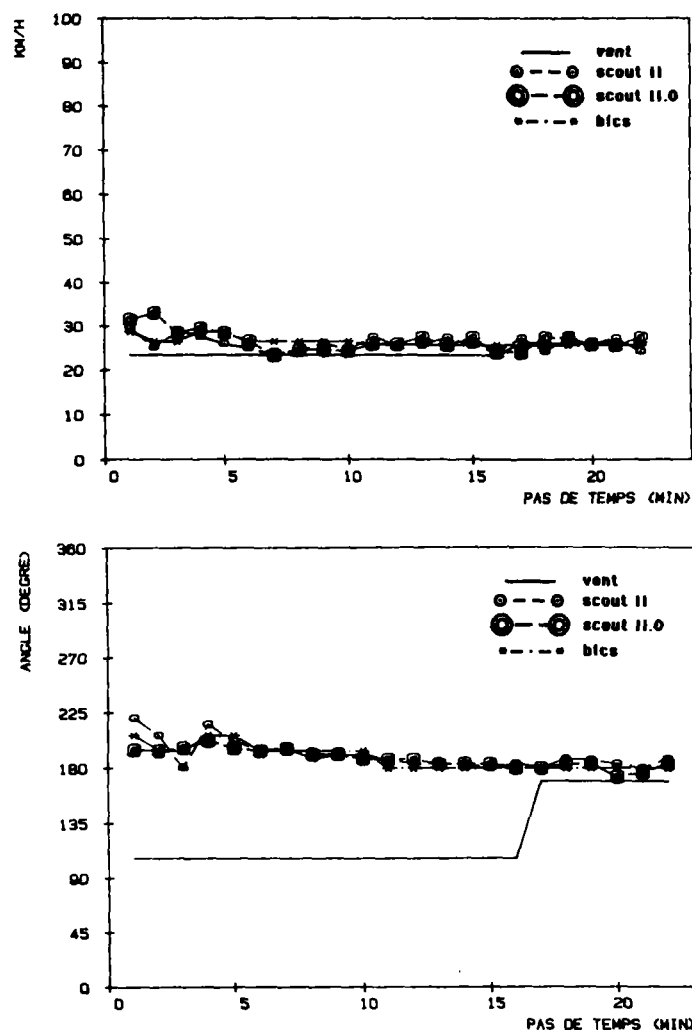


Figure 8.8 : Les vecteurs de prévision

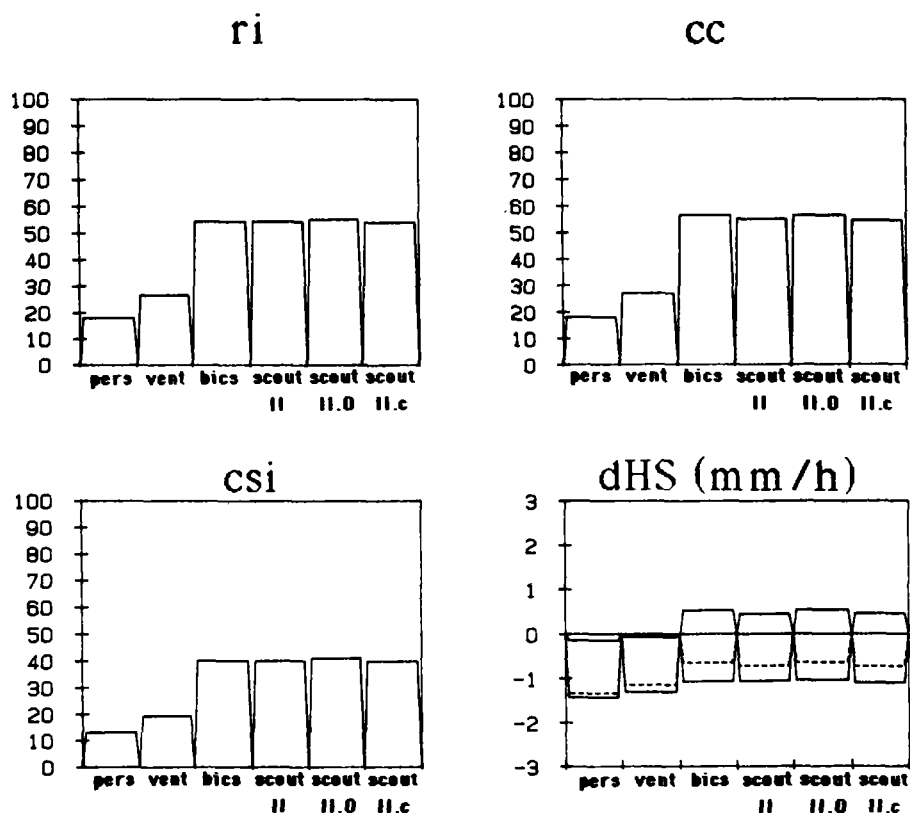


Figure 8.9a-d : Les critères de performance

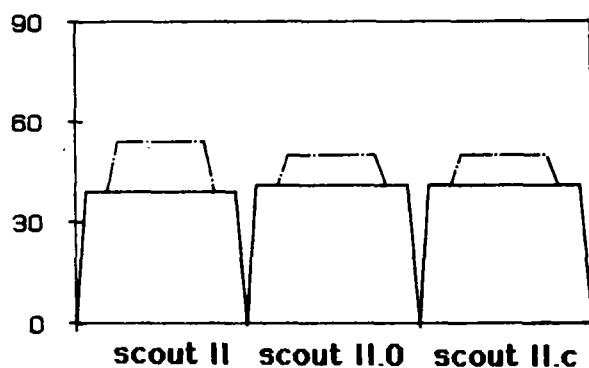


Figure 8.10 : Temps de calcul

8.4. Le 10 septembre 1984

La différence entre la situation précédente et celle-ci ayant aussi un nombre très élevé d'échos, est sa forte instabilité, provoquant la pluie moyenne la plus importante parmi nos événements avec 3 mm/h (fig. 6.6).

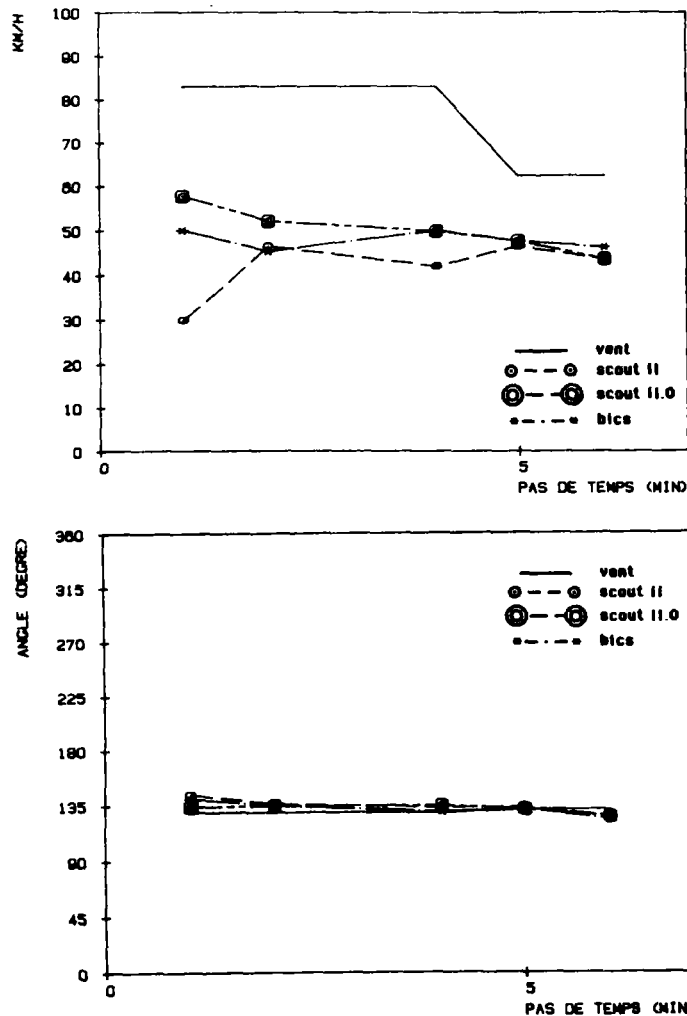


Figure 8.11 : Les vecteurs de prévision

Bien que n'ayant pas trouvé la bonne vitesse du déplacement au départ (fig. 8.11), scout II est toutefois regardé comme supérieur à scout II.0 par les critères RI et CSI. Ceci confirme qu'ils peuvent ne pas être adaptés à l'estimation de la qualité d'une méthode de prévision dans certains cas. En revanche, le coefficient de corrélation croisée et la hauteur d'eau prouvent la supériorité de scout II.0 sur scout II (fig. 8.12a-d). La méthode bics se situe devant ces deux méthodes selon CC, CSI et RI, mais elle est en termes hydrologiques semblable à scout II.0 et scout II.c (qui en moyenne sous-estime le moins la situation réelle). Toutes les autres méthodes sous-estiment systématiquement le volume d'eau réel.

Comme au 5 septembre, le temps de calcul des méthodes scout est le même, et la première prévision nécessite une fois plus de cinquante secondes à cause de l'utilisation de l'algorithme d'agrégation pour deux images à la place d'une seule (fig. 8.13).

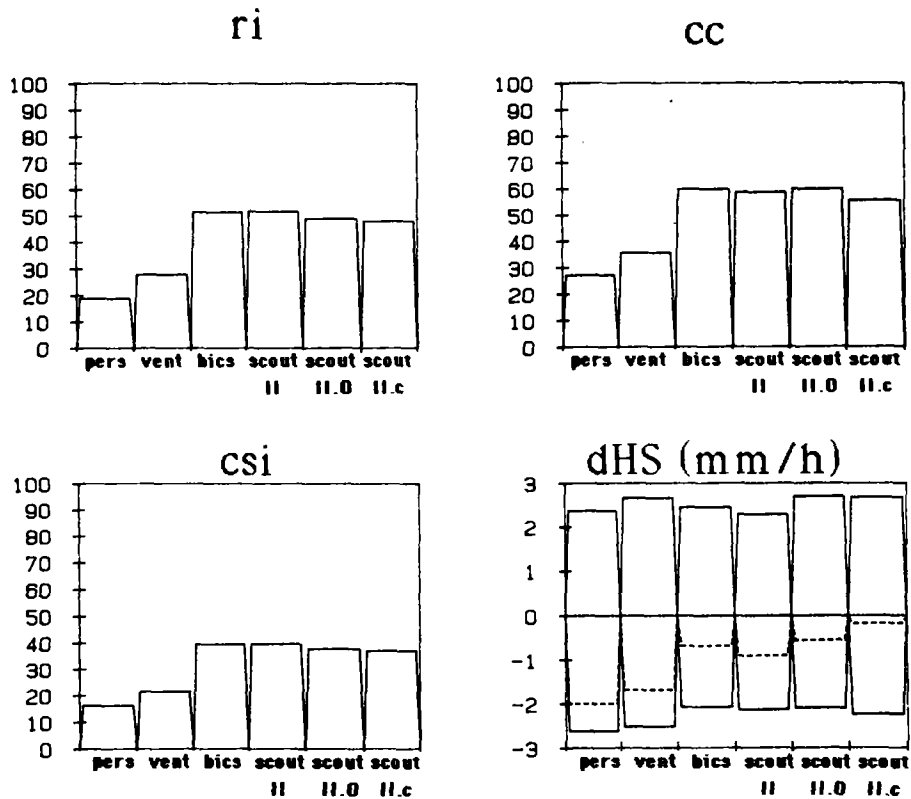


Figure 8.12a-d : Les critères de performance

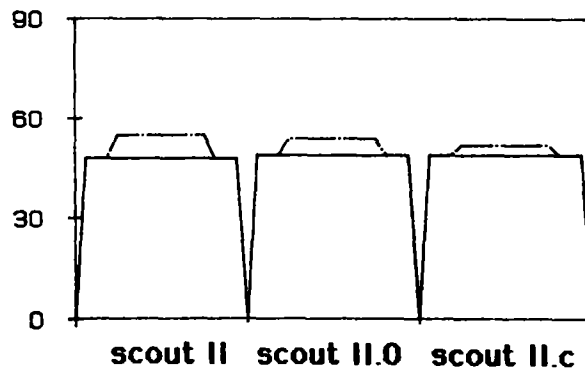


Figure 8.13: Temps de calcul

8.5. Le 1 octobre 1984

La large couverture de l'image par la pluie (fig. 6.7) avec peu d'échos pose des problèmes spéciaux aux méthodes de prévision, aggravés par l'influence du bord.

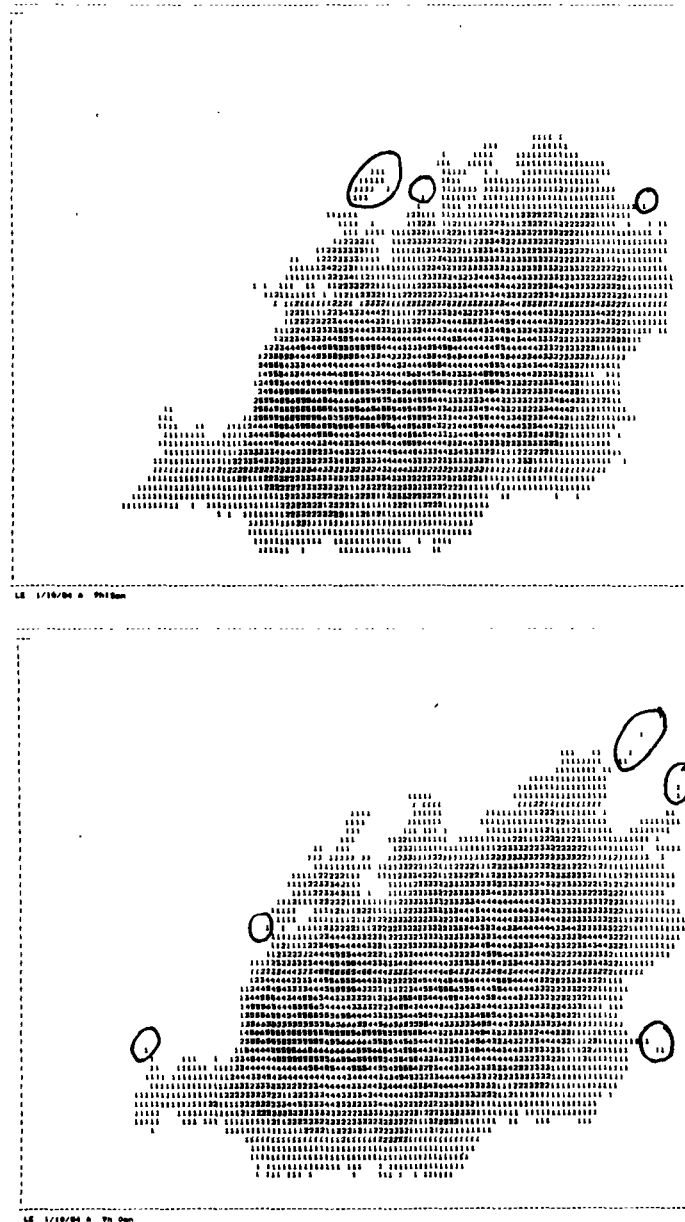


Figure 8.14: Echos parasites comme partenaires de couplage

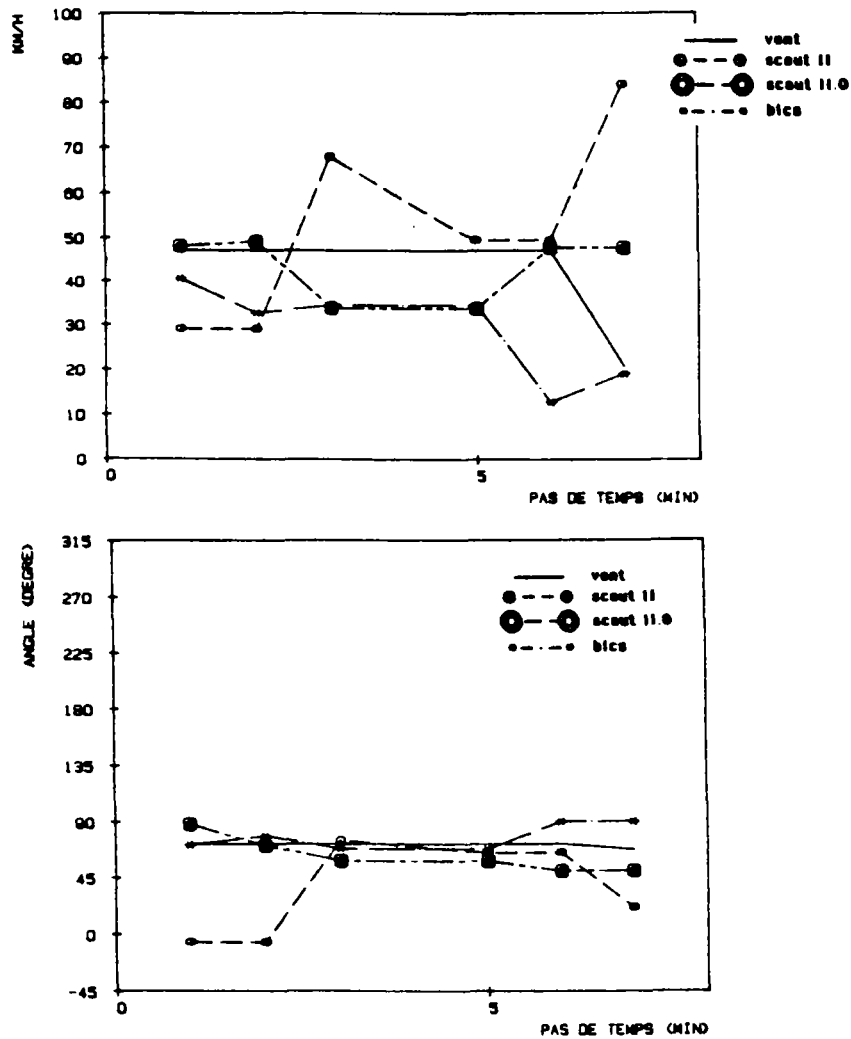


Figure 8.15: Les vecteurs de prévision

Seule la méthode scout II.0 montre un comportement stable. On s'aperçoit que pour la méthode scout II il n'y a que des couplages parasites (fig. 8.14: le couplage de l'écho principal est rejeté à cause d'une détection de l'influence du bord et fig. 8.15). Même la méthode bics souffre de l'influence de la distance qui se manifeste par la disparition d'échos ou de parties d'échos au-delà d'une certaine distance (fig. 8.15a).

Il est intéressant de noter qu'une telle suite de directions de prévision ne provoque guère de changement dans les critères de qualité: toutes les erreurs restent minimales (fig. 8.16a-d). Ici on retrouve alors l'effet de grande couverture, mentionnée en chapitre 7.1.

Notons accessoirement que scout II.0 ne sous-estime pas du tout la hauteur d'eau. L'intensité moyenne de cet événement est de 2.5 mm/h.

L'évolution du temps de calcul est, comme prévu, spectaculaire: une réduction du maximum de 6:11 min. à 49 s pour les méthodes scout (fig. 8.17).

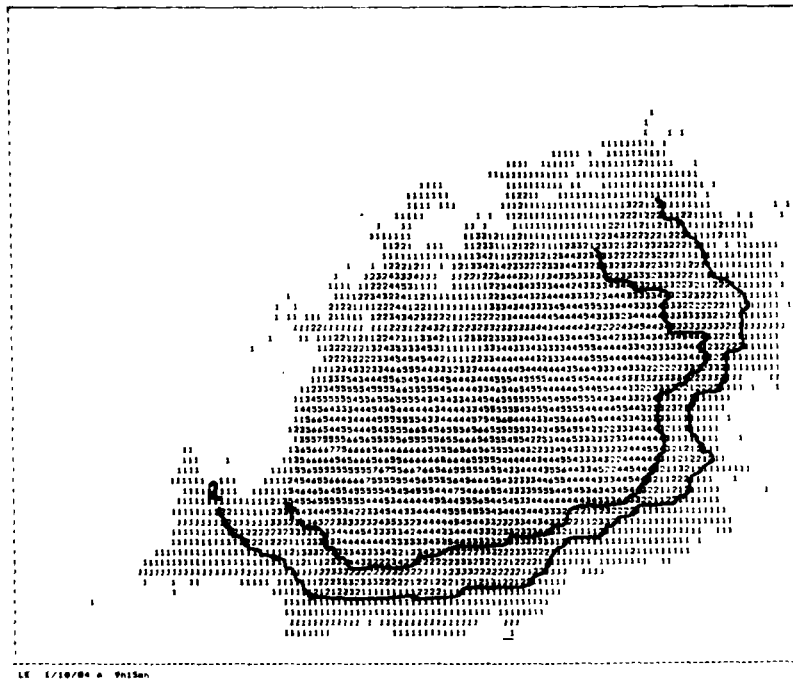


Figure 8.15a: L'influence de la distance sur les échos

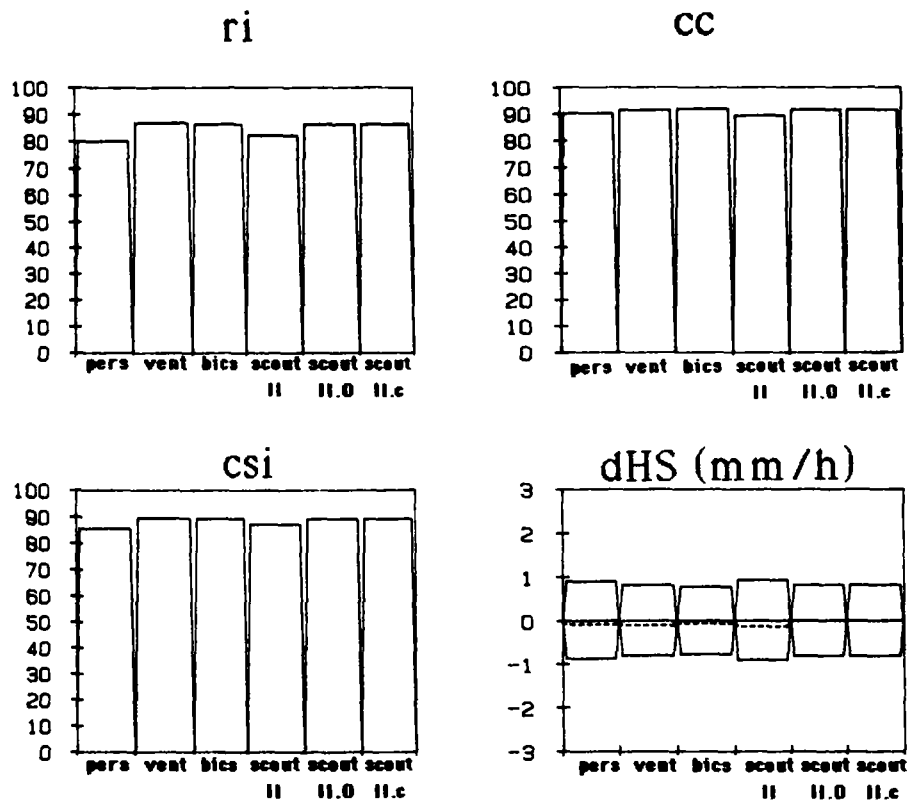


Figure 8.16a-d: Les critères de performance

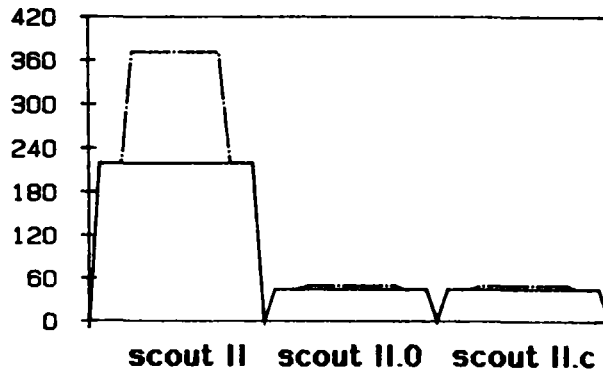


Figure 8.17 : Temps de calcul

8.6. Le 24 octobre 1984

Cet événement est relativement faible : ce n'est que pendant la moitié de la séquence que la pluie dépasse 1 mm/h. Elle est constituée de peu d'échos compacts (fig. 6.8).

La vitesse et la direction du mouvement prévu sont égales pour bics et scout II.0. Scout II conduit à une trop grande variabilité de la vitesse du déplacement prévu. Au pas de temps 5, l'heure d'observation est de 9h45 et de 10h00, ceci est dû à une séparation de l'écho principal, dont le centre de gravité change brusquement l'emplacement (fig. 8.18).

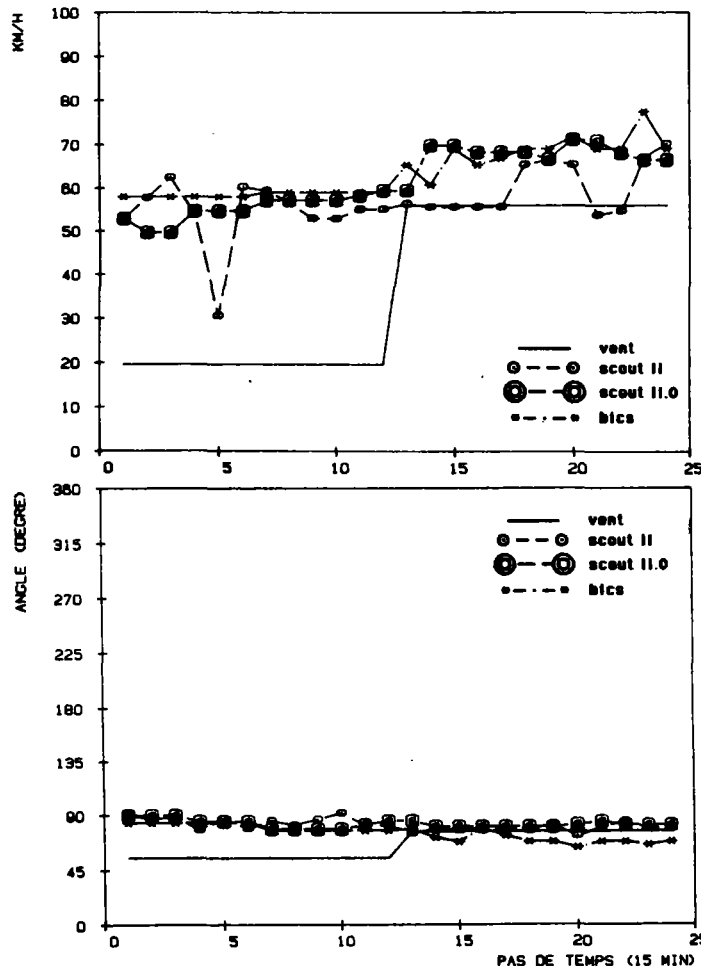


Figure 8.19 : Les vecteurs de prévision

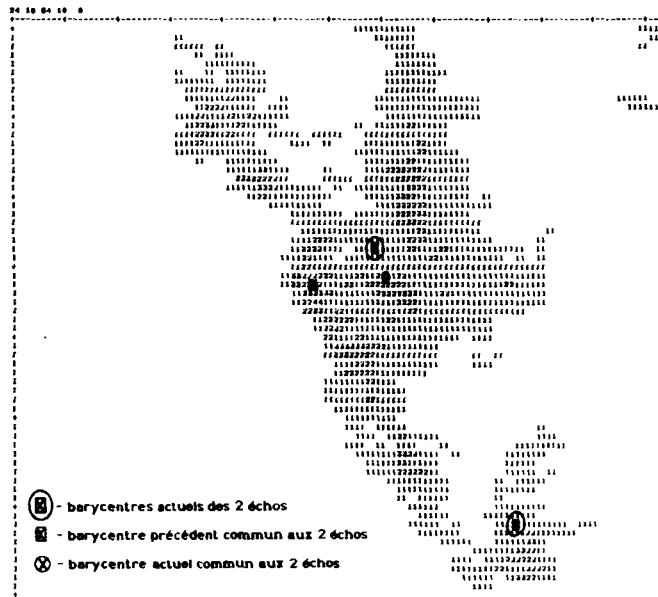
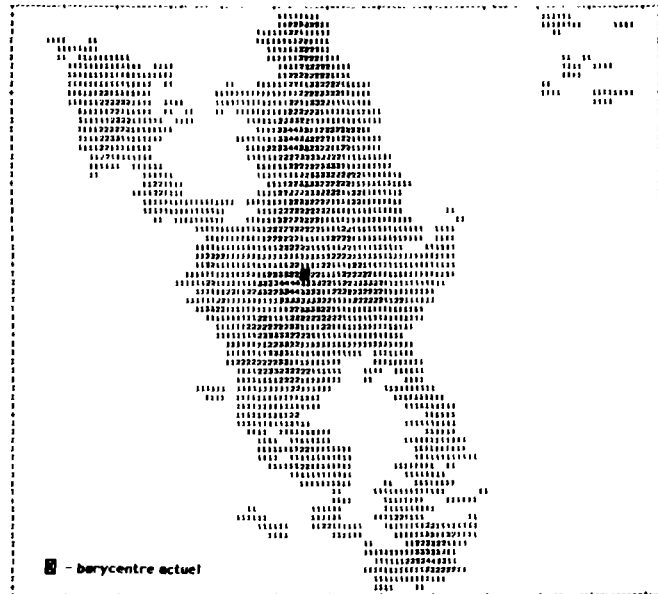


Figure 8.18: Séparation de l'écho principal

La méthode de bics est classée première par tous les critères, y compris la hauteur d'eau. La différence avec scout II.0 est cependant faible et hydrologiquement peu importante (fig. 8.19 et 8.20a-d). En ce qui concerne les critères CC, CSI et RI, scout II.0 est supérieur au vent, le critère hydrologique toutefois montre une égalité entre scout II.0 et le vent, alors proche de bics. La persistance n'est pas capable de faire une bonne prévision avec une sous-estimation de 1 mm/h de la valeur moyenne 1.3 mm/h.

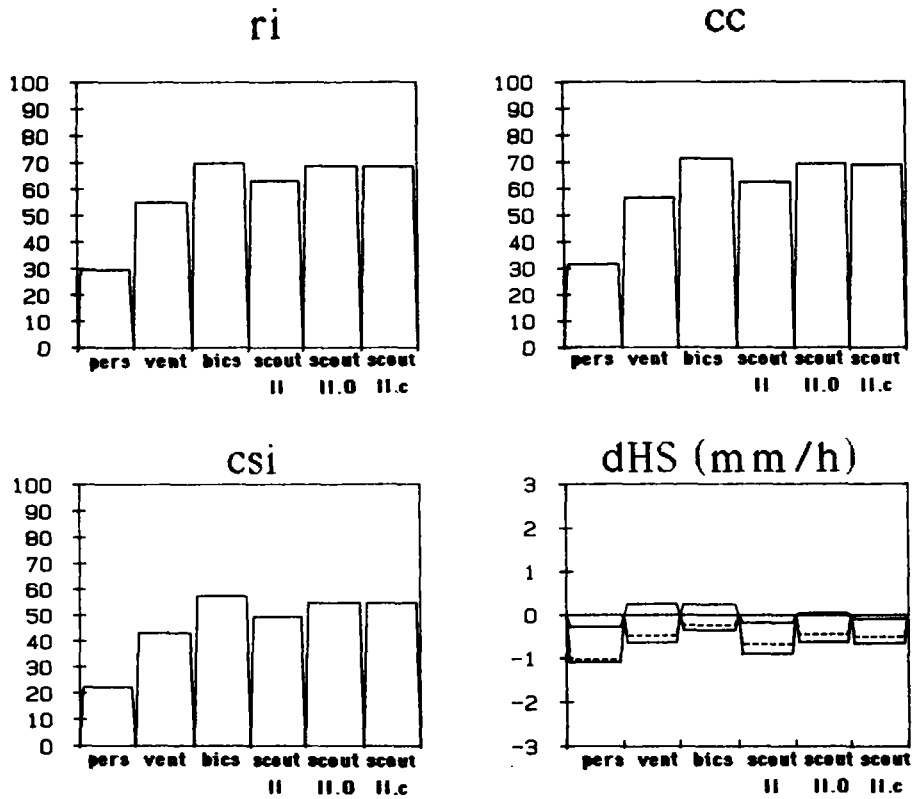


Figure 8.20a-d: Les critères de performance

Le niveau du temps de calcul est le même quelque soit la méthode scout utilisée (fig. 8.21).

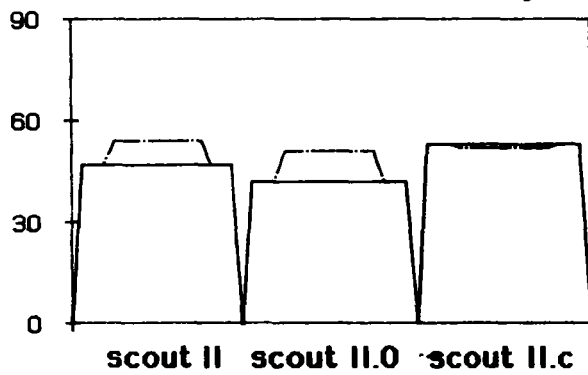


Figure 8.21 : Temps de calcul

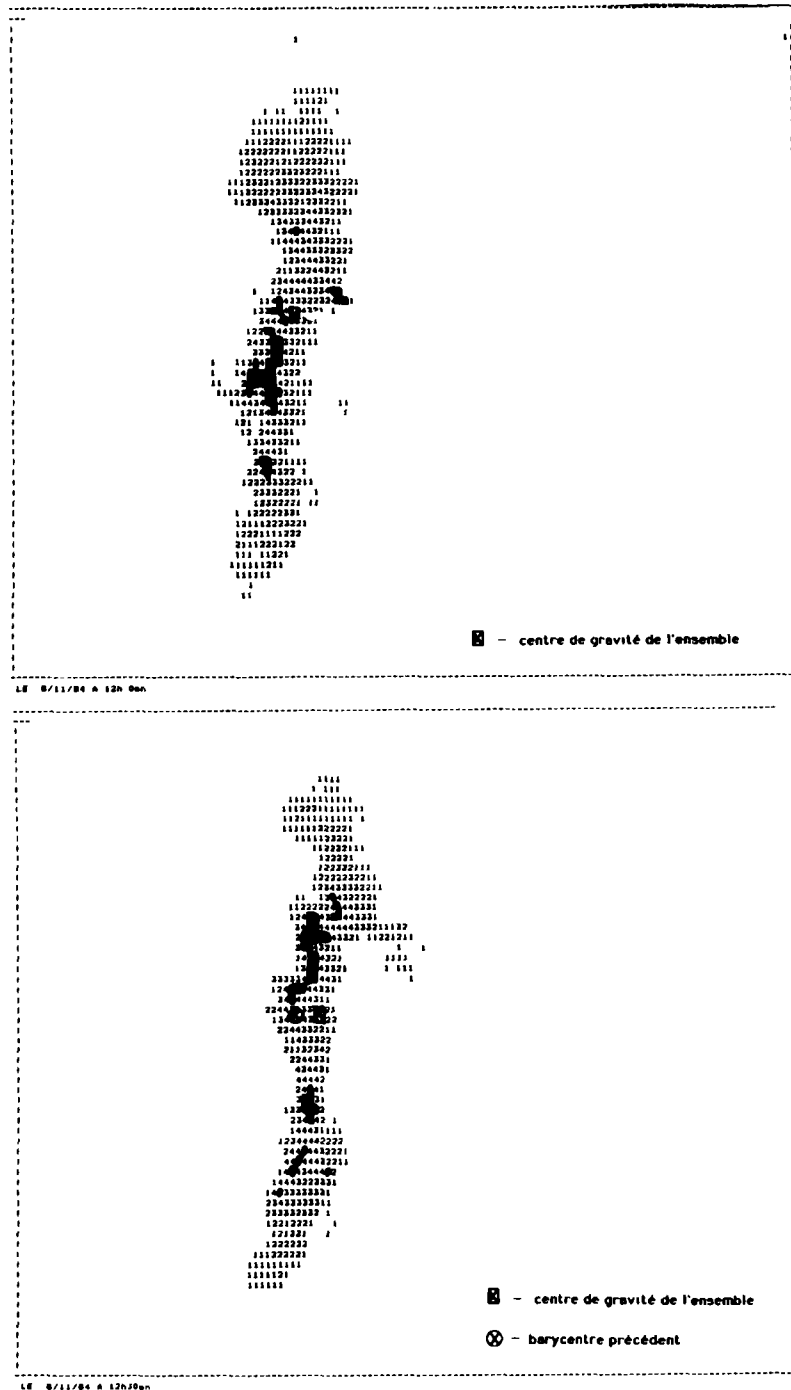


Figure 8.22: Le mouvement différent des échos forts

8.7. Le 8 novembre 1984

Dans cette séquence d'images, l'influence de la distance joue un rôle important. Le grand écho qu'on observe ne se déplace pas premièrement vers l'est, mais il fait partie d'une bande qui va en direction nord/nord-est (fig. 8.22). L'intensité moyenne est de 2.4 mm/h.

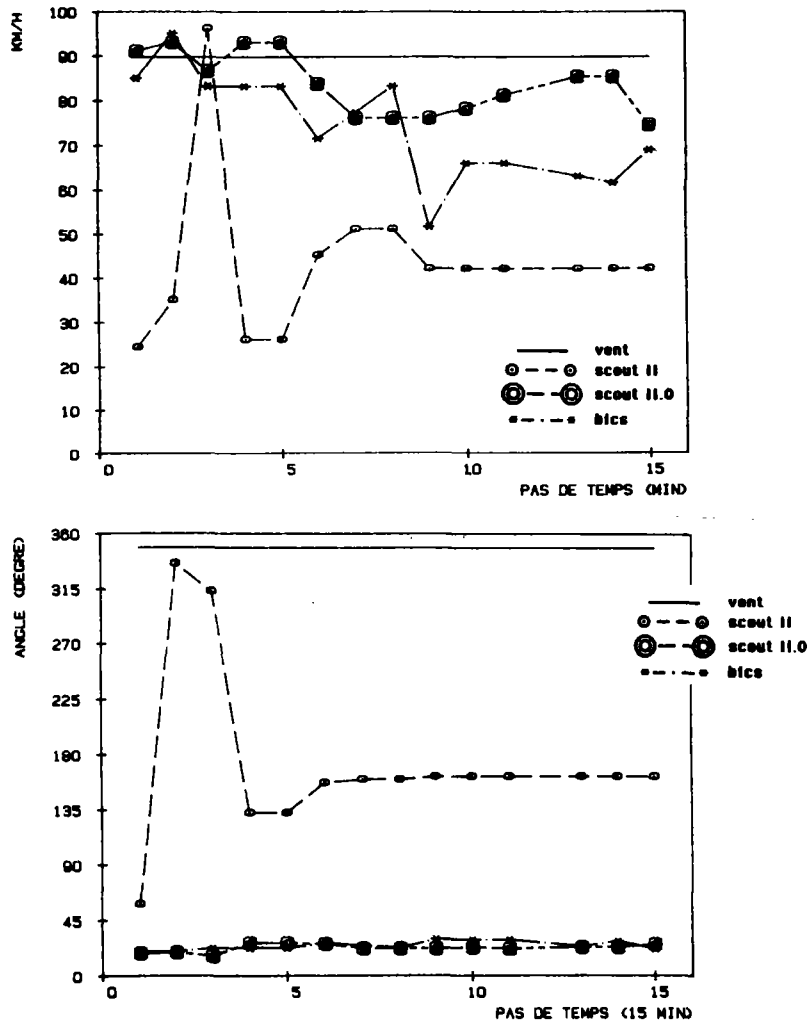


Figure 8.23 : Les vecteurs de prévision

Surtout la méthode scout II, utilisant le grand écho (tous les niveaux dans fig. 8.22), n'est pas capable de reconnaître la bonne direction et vitesse (fig. 8.23), mais aussi le vent ne suit pas la bonne direction. En conséquence, les méthodes scout II.0, scout II.c et bics sont supérieures aux autres, ce qui est montré par tous les critères (fig. 8.24a-d). Les critères CC, CSI et RI donnent un niveau égal à bics, scout II.0 et scout II.c, tandis que le critère hydrologique est en faveur de scout II.0.

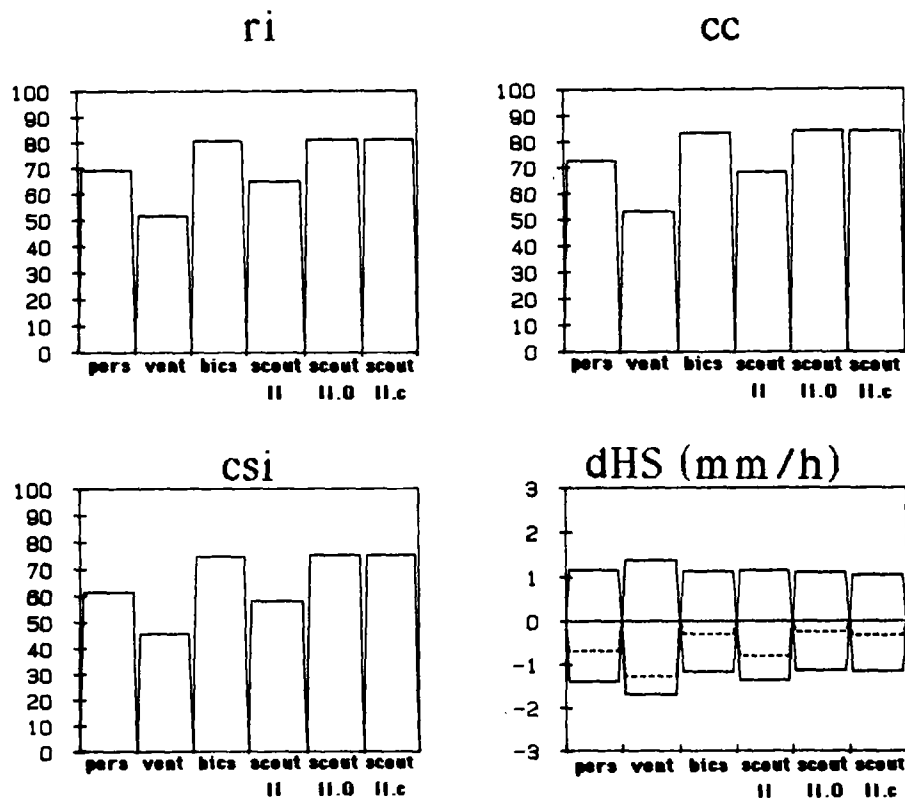


Figure 8.24a-d : Les critères de performance

On a aussi pu réduire le temps de calcul d'environ 30 %, baissant ainsi le maximum de 1:25 minutes à 45 secondes (fig. 8.25).

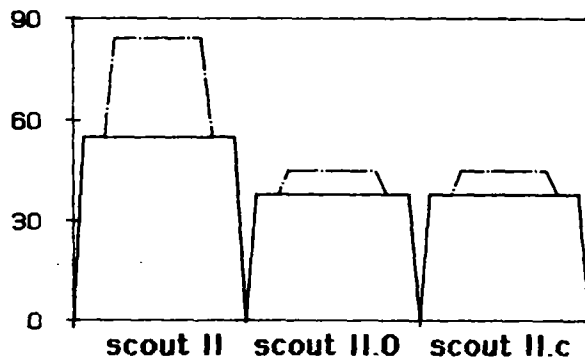


Figure 8.25 : Temps de calcul

8.8. L'importance relative des critères de reconnaissance

Nous avons analysé les causes de couplages des échos sur nos 94 images de test. En tout, il y avait 2560 échos sur les images, dont 860 ont été couplés avec un partenaire. Cela fait un taux de couplage de 40 % du nombre d'échos maximal à coupler.

Sur ces 860 cas, on a regardé le ou les seuls critères de reconnaissance des formes responsables au couplage. Le résultat est à voir dans le tableau 8.2: Il est remarquable que l'angle de l'axe principal d'inertie soit le critère le plus fréquemment utilisé des trois pour retrouver un écho. Mais les autres critères ont tout de même aussi leur justification puisque dans l'événement du 1er octobre, c'est la distribution d'intensité des échos qui est le critère décisif sans lequel on ne peut obtenir une bonne prévision. De plus, presque deux échos sur trois sont reconnus à l'aide de deux critères parmi les trois.

COUPLAGES

| | | | |
|------|--------------------|-----|--------|
| | TOUS | 860 | 100 % |
| dont | 1 critère | 138 | 16.0 % |
| | distribution (dis) | 9 | 1.0 % |
| | élongation (élo) | 20 | 2.3 % |
| | l'angle (ang) | 109 | 12.7 % |
| | 2 critères | 501 | 58.3 % |
| | dis, élo | 37 | 4.3 % |
| | ang, dis | 142 | 16.5 % |
| | ang, élo | 322 | 37.4 % |
| | 3 critères | 71 | 8.3 % |
| | sans critère | 150 | 17.4 % |

Tableau 8.2

Il faut cependant remarquer que nous avons trouvé que la sélection par ces trois critères de reconnaissance des formes joue actuellement un rôle secondaire; il aide toutefois à mieux choisir les partenaires. La sélection principale est faite par la détermination du secteur dans lequel on cherche les partenaires d'un écho. Nous nous en sommes aperçus en couplant tous les échos présélectionnés par le processus de contrôle des vecteurs sans utiliser la sélection par ces trois critères. Nous sommes arrivés à un nombre légèrement plus élevé de couplages ($933 = + 8.5 \%$), ce qui a donné presque les mêmes prévisions sauf pour le 1er octobre, où la sélection par la distribution d'intensité semble être très importante.

Ce dernier résultat nous amène à la conclusion que les paramètres de forme sont dans certains cas des éléments indispensables pour un couplage fiable.

8.9. Caractérisation des prévisions difficiles

L'analyse ci-dessus sur l'importance des critères de sélection des échos a aussi contribué à la caractérisation des cas difficiles à prévoir. Ces cas sont ceux qui sont très sensibles au choix des critères de sélection. Si on modifie légèrement cet ensemble de critères, par exemple en excluant un critère (angle des axes d'inertie) de la sélection des échos, on ne reconnaît plus les échos à coupler, voire la direction du déplacement et alors on n'arrive plus à bien prévoir.

On a pu observer l'absence de problèmes de prévision si les quatre propriétés suivantes sont respectées:

- le nombre d'échos par image est supérieur à 10,
- la variation de ce nombre d'une image sur l'autre est inférieure à 30 %,
- le nombre de couplages par image est supérieur ou égal à 3,
- le taux de couplages est supérieur à 40 %.

Une propriété de deux images servant pour la prévision est cependant beaucoup plus parlante : la différence entre les nombres d'échos des deux images.

Si on constate une grande différence, on peut déduire qu'il s'est produit beaucoup de changements entre les instants de mesure, et on sait que la méthode scout suppose une certaine persistance des structures des images, donc elle va avoir plus de difficultés à trouver des couples.

En outre, on constate que dans une séquence, les instants de prévision dégradée sont ceux où il y a eu un brusque changement du nombre d'échos.

Comme indicateur préalable pour prévoir une bonne performance, nous proposons donc deux critères :

- nombre d'échos ≥ 20 ,
- différence du nombre d'échos entre deux images $< 25\%$ du nombre d'échos moyen.

8.10. Les résultats sur les 1068 images

Les 43 événements ont pu être divisés en 50 suites de prévisions d'une taille comprise entre 4 et 60 images. Parmi ces 50 suites de prévision, il y en a 11 où la méthode bics est supérieure à scout II.0 avec le coefficient de corrélation (CC) et 19 où l'inverse est vrai. Pour les autres suites, leur performance est identique (fig. 8.26).

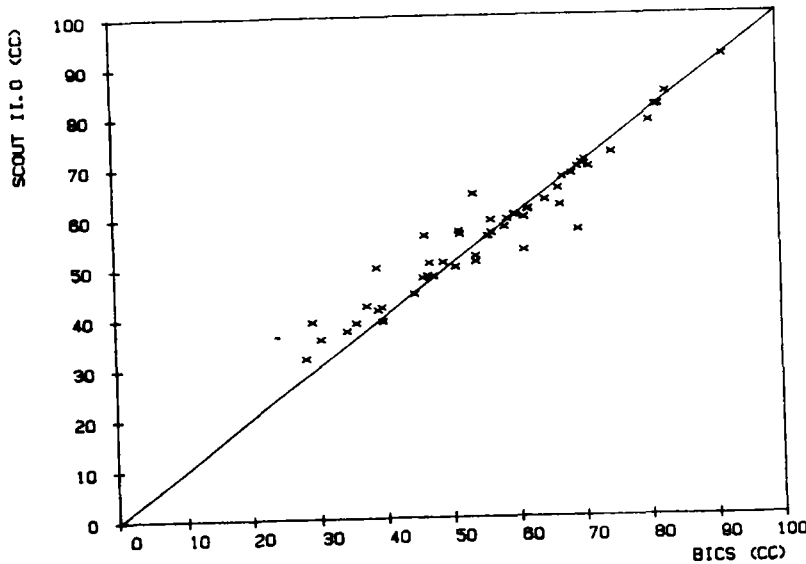


Figure 8.26: La performance de bics et scout II (CC)

Regardant les critères voisins de RI et de CSI (fig. 8.27 et 8.28), il semble que bics soit légèrement meilleure que scout II.0.

Toutefois, la vérification des résultats selon les critères hydrologiques montre que

- les sous-estimations de bics sont en moyenne plus importantes que celles de scout II.0 (fig. 8.29),
- les surestimations de scout II.0 sont en moyenne plus accentuées que celles de bics (fig. 8.30).

PERFORMANCE BICS / SCOUT

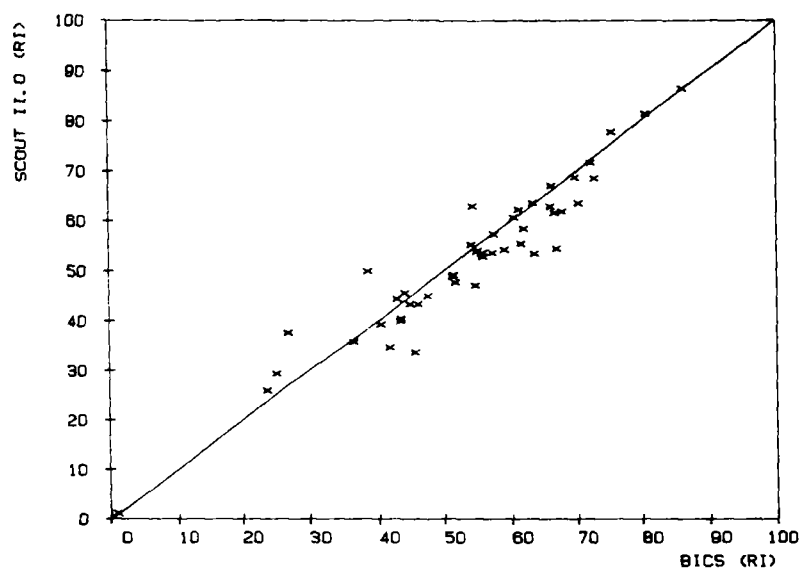


Figure 8.27: La performance de bics et scout II (RI)

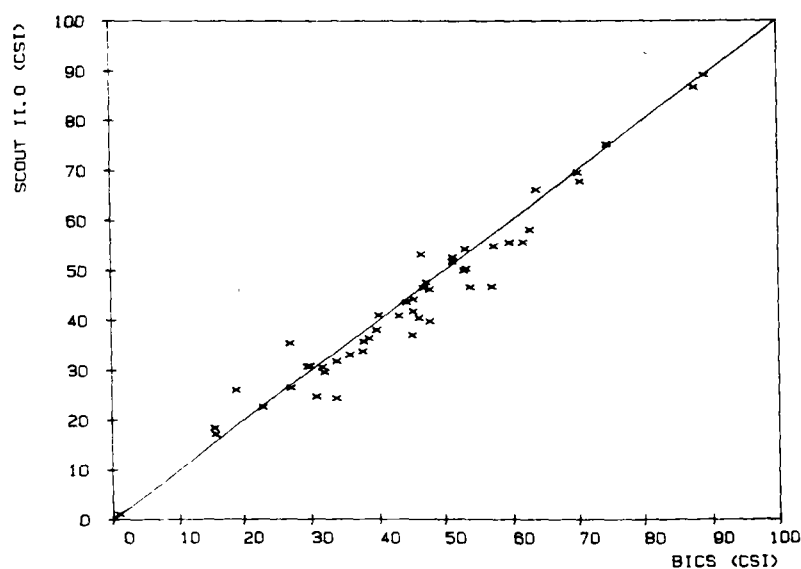


Figure 8.28: La performance de bics et scout II (CSI)

Comme nous savons qu'une surestimation est moins grave qu'une sous-estimation de la même ampleur (cf. chap. 7.3), ces deux résultats indiquent que la prévision scout II.0 a des qualités légèrement supérieures pour notre application.

De plus, on voit dans la figure 8.31 que les surestimations exceptionnelles comme celles situées sur l'axe des ordonnées dans la fig. 8.30, ont une importance négligeable si on regarde tout l'événement.

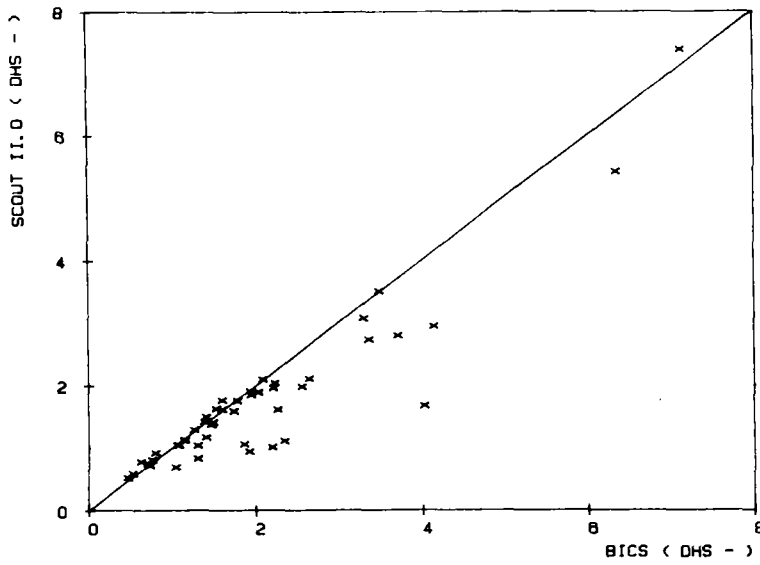


Figure 8.29: La performance de bics et scout II (dHS-)

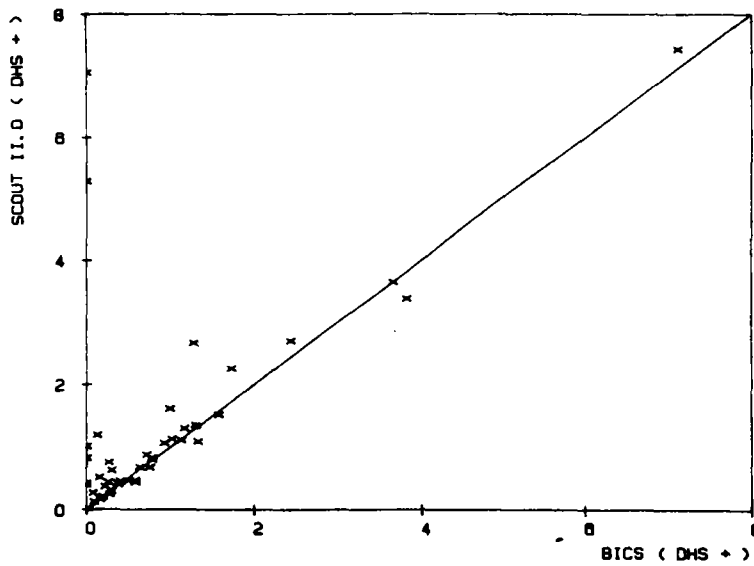


Figure 8.30: La performance de bics et scout II (dHS+)

Supposant une même importance de sur- et de sous-estimations, un critère $|dHS|$ (fig. 8.32) arrive à sensiblement le même résultat que dHS- (fig. 8.29): les erreurs de bics sont plus importantes que celles de scout II.0, surtout pour des événements dépassant 1.5 mm de pluie par heure pendant toute la durée de l'événement sur tous les points où il a plu.

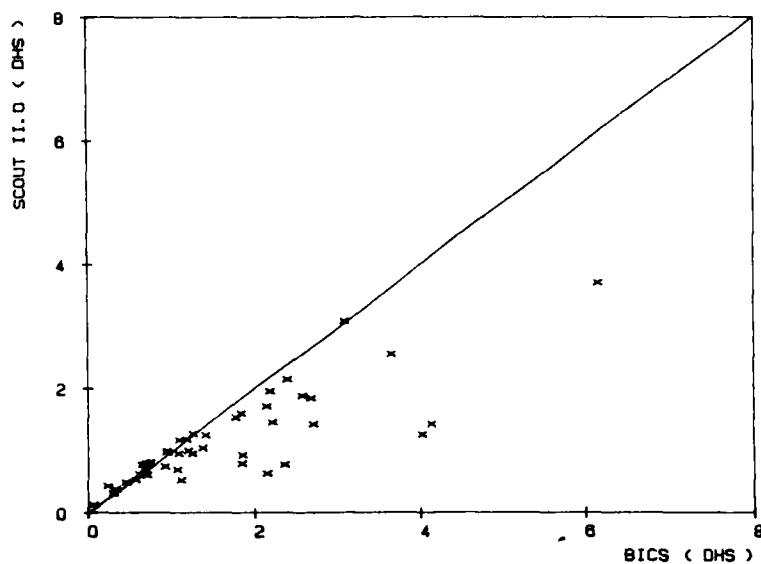


Figure 8.31: La performance de bics et scout II (dHS)

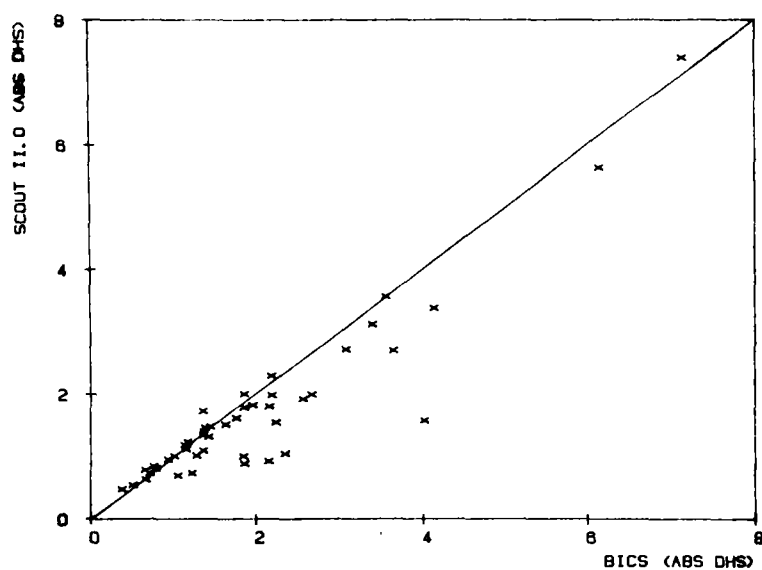


Figure 8.32: La performance de bics et scout II ($|dHS|$)

8.11. L'événement du 24 août 1987 - on approche les limites actuelles d'une prévision automatique

Pendant la nuit du 24 au 25 août 1987 on a mesuré la plus grande pluie de ces dernières années en région parisienne: elle a donné 100 mm d'eau en douze heures.

Cette pluie n'était pas uniforme; il y avait de grosses variations d'intensité, des changements de forme importants et des différences considérables de mouvement entre les cellules pluvieuses (fig. 8.33). Ceci a entraîné la première utilisation réelle du système de gestion automatisée du département de la Seine-Saint-Denis, grâce auquel on a pu éviter des dégâts importants (Jacquet, 1987).

Vers 18h30 heure locale (égale à 17h30 TU) on a observé trois échos qui ont menacé le département (fig. 8.34, niveaux supérieurs à 5 mm/h). La figure 8.35 illustre le comportement différent de ces échos entre 17h30 TU et 19h15 TU. On y observe une nette évolution dans cette suite d'images, où l'écho au milieu de l'image traverse le département, le deuxième (à droite) se dissipe et le troisième reste stationnaire.

Pendant ce temps, on a enregistré à Rosny sous Bois les valeurs pluviographiques présentées sur la figure 8.36. On y observe le passage de l'écho en question.

Pour la prévision (hors temps réel) nous avons utilisé les méthodes bics et scout II.0. Comme la méthode bics n'est pas capable de suivre automatiquement des échos différents, la prévision fournie par cette méthode était la persistance pendant la première heure de l'événement. Ainsi, cette méthode sous-estime considérablement la situation réelle (tableau 8.3), alors que la méthode scout II.0 se comporte mieux pendant cette période.

Cette partie de l'événement montre que scout II.0 déplace bien les échos en cas de mouvement anisotrope. Puisque l'événement analysé était d'une importance hydrologique considérable, on peut constater que ceci n'est pas une caractéristique négligeable.

Bien entendu, des changements de forme dans des situations si variables ne sont pas encore traitables comme on l'a vu auparavant. Etant confronté à un tel problème sur un grand écho vers 23h45 TU, scout II.0 a la tendance d'interpréter cette variation de forme comme un mouvement et alors il cherche désespérément à trouver un déplacement raisonnable, tandis que bics ne prévoit simplement aucun déplacement (comme cette méthode l'a fait pour 20 des 28 prévisions de cet événement).

L'événement du 24 août 1987 ne montre donc pas seulement les limites de la méthode bics mais également des limites générales pour les méthodes de prévision d'aujourd'hui.

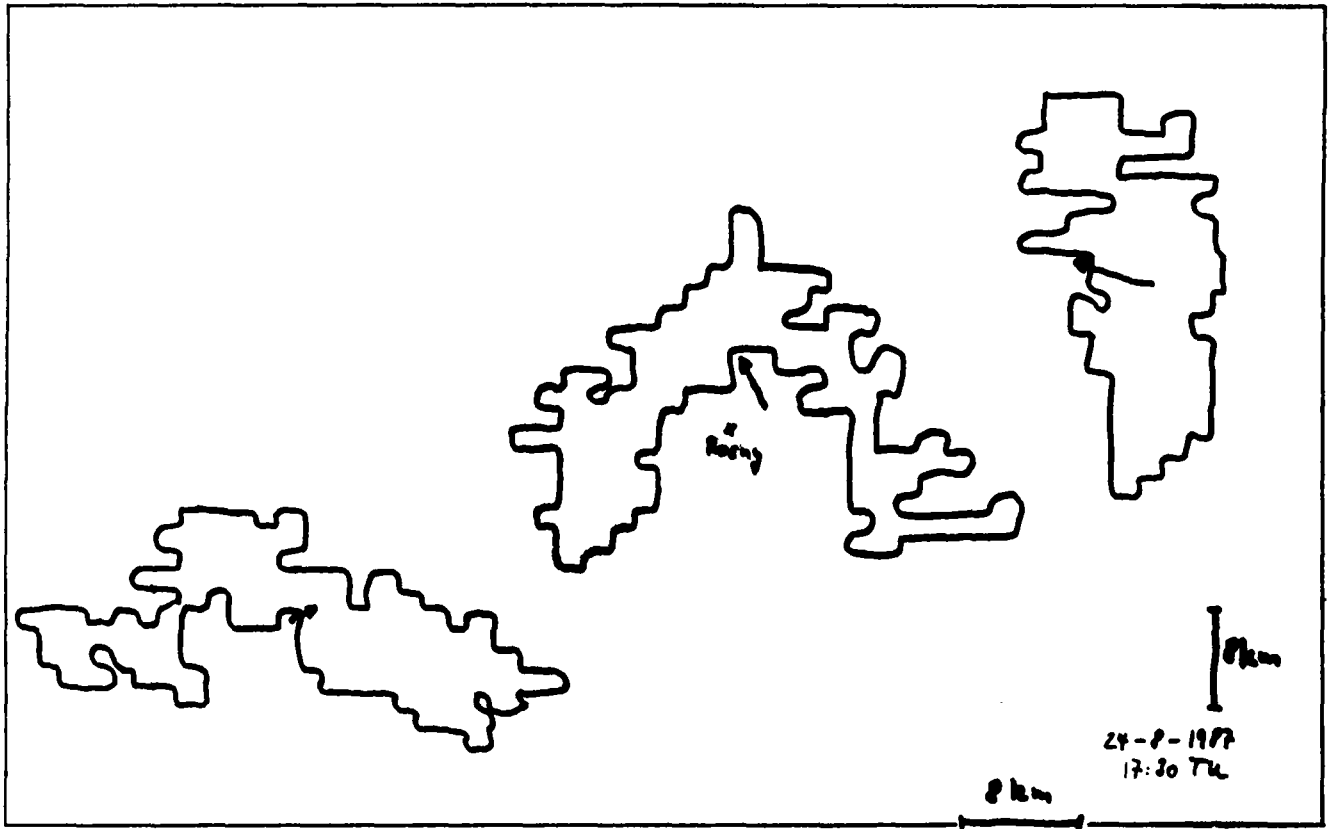
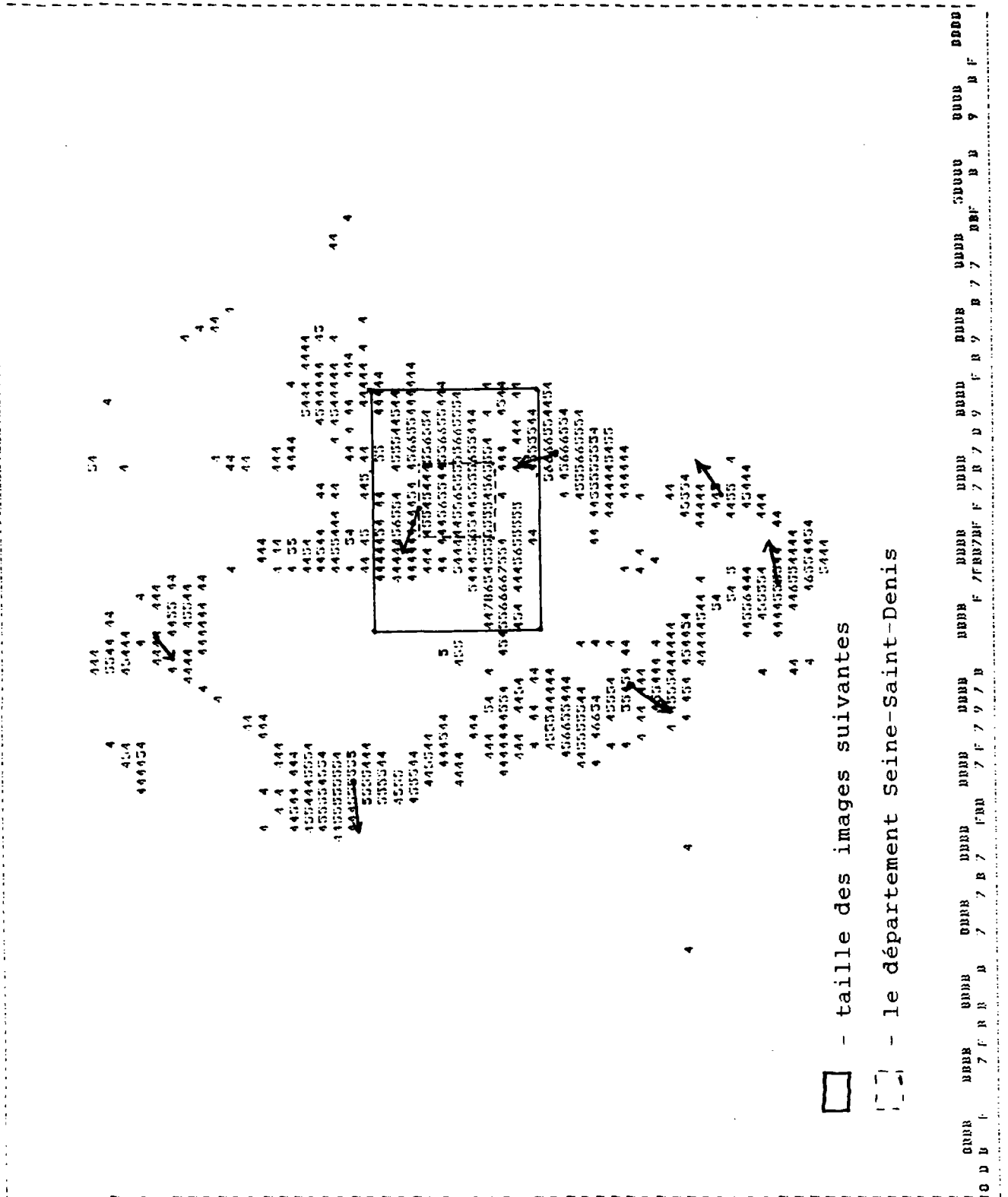


Figure 8.34: Situation autour du département



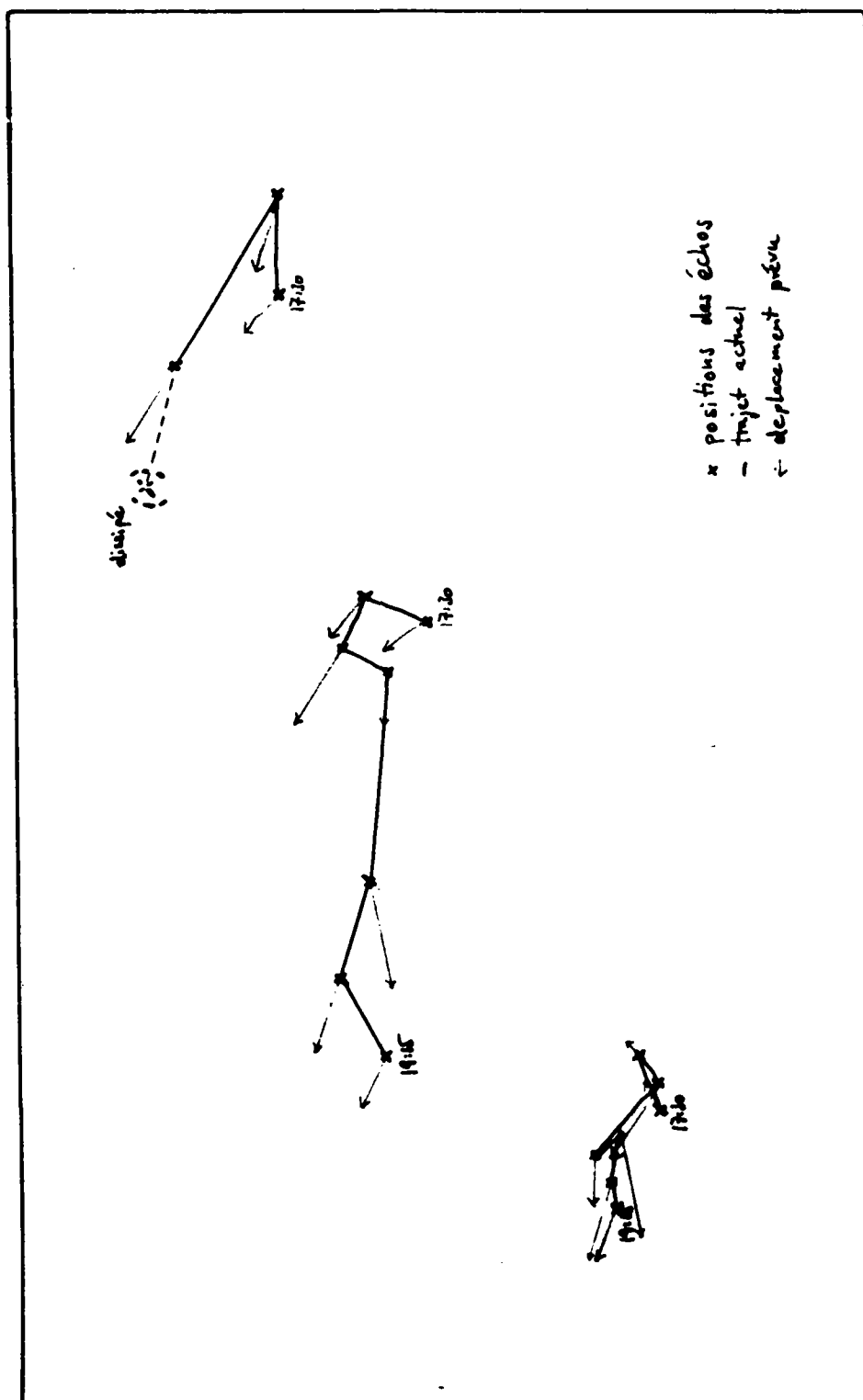


Figure 8.35: Le déplacement prévu et observé des échos sur la figure 8.34

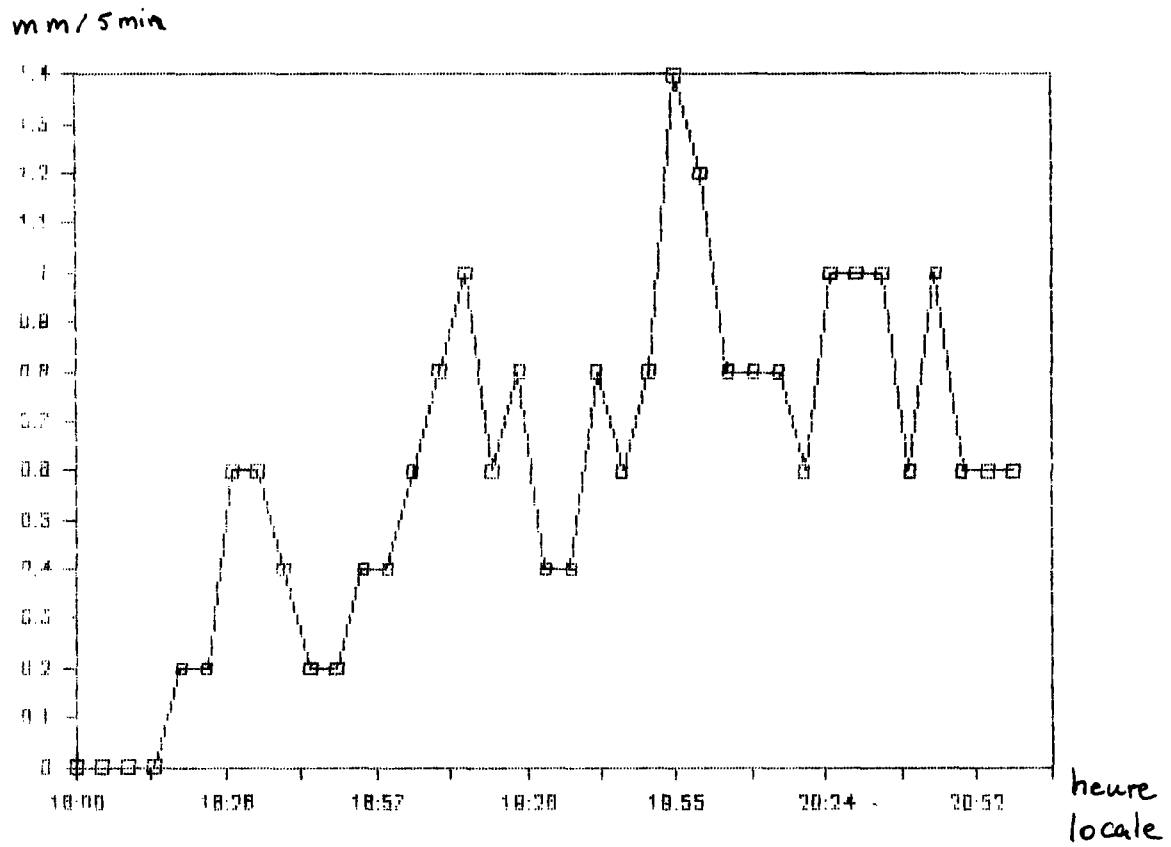


Figure 8.36: Les intensités de pluie enregistrées à Rosny sous Bois entre 18h00 et 21h00 locale (17h00 TU et 20h00 TU)

| heure | intensité moyenne | bics | | | | scout II.0 | | | |
|-------|----------------------|------------------|------|------|------|------------------|------|------|------|
| | | vecteur prévu | dhs | dh- | dh+ | vecteur prévu | dhs | dh- | dh+ |
| 17 15 | 3 66 | 0 0 | 1 35 | 1 47 | 1 21 | -13 8 | 1 09 | 1 16 | 1 04 |
| 17 30 | 3 59 | 0 0 | 1 08 | 1 45 | 0 89 | -5 5 | 1 26 | 1 28 | 1 24 |
| 17 45 | 3 90 | 0 0 | 1 20 | 1 25 | 1 13 | -5 5 | 1 09 | 1 16 | 1 00 |
| 18 00 | 3 87 | 0 0 | 1 27 | 1 38 | 1 17 | -6 5 | 1 07 | 1 13 | 1 03 |
| 18 30 | 3 76 | 8 -2 | 1 30 | 1 63 | 1 16 | -7 0 | 1 29 | 1 68 | 1 11 |
| 18 45 | 3 05 | 0 -4 | 1 50 | 1 19 | 1 65 | -10 -2 | 0 73 | 0 63 | 0 78 |

Tableau 8.3: Les prévisions par bics et scout II.0 entre 17h15 et 18h45 TU

(le vecteur prévu de scout II.0 est une moyenne des vecteurs individuels)

8.12. Résumé des prévisions test

L'analyse de cette série de prévisions a prouvé que les méthodes scout II.0 et bics sont bel et bien capables de prévoir précisément dans les diverses situations météorologiques. En moyenne, on arrive à une légère supériorité de bics pour les critères traditionnels (CC, CSI, RI) et à une supériorité de scout II.0 pour le critères hydrologiques, calculés sur des petites surfaces (4.8 x 4.8km). En ce sens, le but de la recherche entreprise est atteint.

Les mesures prises pour améliorer les méthodes traditionnelles de reconnaissance des formes comme scout II, notamment le choix d'un niveau d'intensité de pixel supérieur, l'approche des séparations et aggrégations d'échos et l'initialisation du vecteur de déplacement par le vent mesuré à 3000 m d'altitude lors du plus récent radiosondage de Trappes ont eu les effets souhaités:

- une baisse considérable du temps de calcul dans les situations lentes ;
- une nette amélioration en qualité de prévision selon tous les critères utilisés.

On a également pu mettre en évidence sur la pluie la plus importante de cet échantillon test (10 septembre 1984) que la méthode de prévisions convectives (scout II.C) peut contribuer à améliorer les résultats. Toutefois sur les autres événements il ne peut y avoir de détérioration, il faut donc bien choisir les événements, où une telle méthode peut bien fonctionner. Pour sélectionner ces événements à priori, il reste à analyser dans les recherches postérieures :

- quel pas de temps est suffisant pour prévoir une tendance du développement d'un écho,
- jusqu'à quelle échéance peut-on raisonnablement utiliser une simple extrapolation, et
- quel est l'impact hydrologique d'une telle méthode de prévision.

Une analyse du caractère des situations difficiles à prévoir a montré que les situations, où la méthode scout II.0 a une moindre fiabilité, sont caractérisées

- à la fois par un nombre d'échos inférieur à 20,
- et par une différence du nombre d'échos entre les deux images servant pour la prévision supérieure à 25 % du nombre d'échos moyen.

Ce sont aussi les situations où scout II.0 est le plus sensible.

Finalement, les statistiques sur l'importance des différentes caractéristiques de forme précisent les directions de recherche pour améliorer encore la méthode de couplage: l'utilisation de l'élongation et de la distribution d'intensité d'un écho peut encore être améliorée.

La recherche future doit donc s'orienter vers les solutions des cas difficiles, qui heureusement sont reconnaissables avant toute prévision.

Comme toute analyse de comportement d'un écho individuel est basée sur un suivi fiable de tous les échos sur une longue durée, il sera indispensable de reconnaître plus de 40% des échos. Pour parvenir à ce point, on peut se servir de la variabilité du vecteur de prévision comme indicateur.

En conclusion, dans les recherches futures, l'amélioration apportée par la prévision des changements d'intensité, de forme et de taille des échos ne devra pas être jugée sur les critères traditionnels, ni sur toutes les situations. Seulement les situations identifiées à priori comme hydrologiquement critiques et comme prévisibles à l'aide de critères comme

- nombre d'échos reconnus et
- variabilité du vecteur de déplacement

sont à utiliser pour une telle prévision.

**APPENDICE : IMPLANTATION DU MODELE SUR LE SYSTEME
D'AIDE A LA CONDUITE DU DEPARTEMENT
SEINE-SAINT-DENIS**

CHAPITRE 9

OBJECTIFS POUR LE SERVICE OPERATIONNEL

Comme déjà remarqué à plusieurs reprises, le modèle de prévision doit être intégré au système de gestion automatisée du réseau d'assainissement du département de Seine-Saint-Denis. Cela entraîne des conséquences sur la méthode de prévision, notamment en matière de temps calcul, qui n'apparaissent pas dans des systèmes dédiés à la seule prévision radar.

9.1. Brève présentation du système de gestion automatisée

Une gestion automatisée d'un réseau d'assainissement se base principalement sur les mesures hydrologiques et les possibilités d'influer sur l'état du réseau par la manipulation des vannes, utilisation des bassins de retenue, ...

L'approche de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE), qui a commencé à concevoir un tel système après avoir profondément appris le fonctionnement du réseau, a très bien été documentée dans Bachoc (1984). Elle consiste principalement à utiliser un tel système informatique comme outil aidant les personnes responsables à prendre des décisions plutôt que comme système agissant totalement automatique.

Pour rendre opérationnelle cette idée, l'équipe a désigné plusieurs modules qui ont des tâches différentes :

- le réseau des télémesures ;
- les stations locales ;
- le système de Conduite Immédiate (SCI) et
- le système d'Aide à la Conduite (SAC).

L'ensemble est surveillé par un responsable ("pilote") qui prend toutes les décisions.

L'idée est que les mesures locales sont d'abord fournies aux stations locales (fig. 9.1).

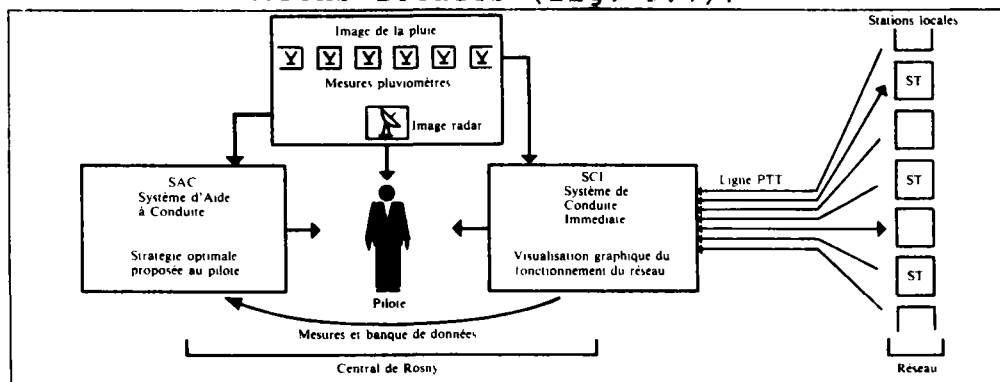


Figure 9.1: Schéma organisateur du système de gestion

Les stations locales donnent des consignes pour la gestion des barrages dans le cas d'un mauvais fonctionnement de la liaison avec la centrale de gestion. Ils testent aussi le bon fonctionnement des éléments autogérables et les fixent, en cas nécessaire, dans une position "défaut".

Les informations sont transmises ensuite au SCI, qui les groupe, les stocke et les met à disposition du pilote. Le pilote peut maintenant décider s'il regarde quelques valeurs comme non fiables ou même fausses et les corriger ou les considérer invalides.

Cette base d'information corrigée entre comme données dans le SAC. Les autres données du SAC sont l'information sur la pluie actuelle et éventuellement prévue. Pour toutes les informations fournies, le pilote va utiliser sa compétence pour valider ou non les données mesurées et calculées, voire les corriger en fonction de son expérience.

Toute information sélectionnée ainsi entre dans le SAC et permet de simuler le comportement du réseau sous différentes stratégies de gestion qui sont mises en oeuvre par des modèles hydrauliques d'écoulement, des modèles d'optimisation etc.

Ainsi, le pilote obtient une idée des conséquences induites par chacune de ses décisions. Cela lui permet alors de soigneusement sélectionner en temps réel des décisions correspondant à une stratégie optimale.

9.2. Les quatre modes de fonctionnement du système

Pour bien pouvoir répondre aux nécessités, on a créé quatre modes de fonctionnement (Jacquet, 1986) du système dont trois représentent les trois possibilités opérationnelles (temps sec, temps de pluie, danger d'inondations) et le quatrième est un outil d'apprentissage de la gestion (simulateur).

9.2.1. Le suivi courant

Comme l'indique le nom, c'est le mode le plus fréquent. Il n'y a pas de pluie et il n'exige pas une présence permanente du pilote au central de gestion.

Tous les éléments informatisés (SCI, SAC, mesures télétransmises) fonctionnent automatiquement et fournissent une base de données des valeurs recueillies pour l'utilisation ultérieure sur le simulateur hors temps réel. Cette base de données peut ensuite servir pour la mise à jour des vannes et des défauts des équipements locaux (et prendre des décisions en conséquence, par exemple, réparer des vannes défectueuses). Une deuxième application est l'entraînement de pilotes sur des défauts du système possibles.

9.2.2. Le suivi spécial

Il y a deux possibilités pour lancer ce mode :

- soit automatiquement par le système qui aurait détecté un début de pluie,
- soit par le pilote lors d'une situation de surveillance particulière (analyse de certains aspects du réseau, travaux à hauts risques dans le réseau, pollution observée, ...)

Dans le premier cas, c'est un pluviomètre qui dépasse un seuil prédéfini et déclenche ce mode automatiquement. Dans le deuxième cas, c'est le pilote lui-même qui lance la commande, ou bien un capteur qui mesure un phénomène anormal (pollution, ...).

Ce qui est essentiel dans ce mode, c'est la non-utilisation du logiciel d'aide à la conduite (LAC) qui comprend entre autre les programmes de simulation et d'optimisation du réseau.

9.2.3. Le suivi exceptionnel

En mode de suivi exceptionnel, le pilote est obligatoirement présent, les programmes de simulation sont utilisés et les mesures sont enregistrées. Il s'agit alors d'un cas de surveillance exceptionnelle, qui entre en fonctionnement seulement en présence d'une situation menaçante.

9.2.4. Le simulateur

En utilisant les scénarios stockés, ce mode permet de rejouer des situations réelles, comme si elles se déroulaient présentement.

Ce mode a alors été conçu pour quatre raisons principales:

- l'entraînement des pilotes,
- présentation des possibilités du système au public,
- test hors temps réel de nouveaux outils informatisés,
- analyses détaillées des événements passés.

9.3. Les objectifs pour l'introduction de la prévision

Dans un premier temps, la prévision automatique va être introduite dans le système de gestion automatisée en deux points (Jacquet, 1987):

- dans le simulateur pour tester la fiabilité de cet outil, sa marge d'erreurs, etc. en service hors temps réel pour une utilisation ultérieure avec les modèles hydrauliques d'optimisation,
- dans le suivi courant et spécial, pour alerter le pilote (qui est absent) à l'avance de la possibilité d'une pluie importante.

Outre, l'outil de prévision faisant partie du système en temps réel, la méthode de prévision doit remplir les conditions limitantes

- être fiable en termes hydrologiques,
- être rapide (< 60 secondes en tout cas), surtout pour ne pas surcharger l'ordinateur sur lequel tourne le système de gestion au même temps dont les temps de réponse ne doivent pas être dégradés par l'introduction de la prévision,
- estimer sa propre fiabilité.

Nous avons vu dans les chapitres précédents que les deux premières conditions sont tenues. La troisième est en cours d'achèvement au CERGNE (Denoeux, 1988), et elle va permettre de mieux estimer la fiabilité de la méthode scout II.0 que le font les deux critères présentés dans le chap. 8.9.

9.3.1. L'utilisation pour les astreintes

Le système d'astreintes à la DDE Seine-Saint-Denis a comme objectif d'alerter une équipe d'intervention en cas d'événements dangereux. Depuis mai 1987, il a été mis en marche en utilisant des pluviographes du département qui ont automatiquement donné l'alerte aux personnes en charge dès qu'il y avait un pluviographe qui a enregistré une intensité de pluie dépassant 5 mm/h. Ce système est en vigueur sept jours sur sept et 24 heures sur 24.

L'équipe d'intervention se constitue de quatre personnes: un "pilote", un technicien et deux ouvriers qui peuvent être automatiquement appelés par téléphone. Ils disposent chacun d'une voiture de service équipée avec une radio et d'un minitel où ils peuvent demander des informations supplémentaires (météorologiques, état du système d'assainissement, mesures) et contrôler si l'événement annoncé va vraiment arriver ou si c'était une fausse alerte.

Par rapport au système d'alerte basé sur les seuls pluviographes départementaux, la prévision radar augmente le temps d'alerte de 30 à 120 minutes.

Ce gain de temps de réaction implique directement la possibilité d'une meilleure gestion du système d'assainissement pour les heures où normalement tout le monde est absent (pendant la nuit et le week-end).

L'équipe en astreinte peut alors dans ce cas se rendre plus tôt au central de gestion pour surveiller le fonctionnement du réseau de près. Ainsi, on peut réagir plus efficacement à un mal fonctionnement d'éléments du réseau et avec moins de danger pour le personnel (avant que la forte pluie ne tombe).

Il y a une deuxième application de la prévision radar dans ce cadre qui touche les interventions de courte durée dans les égouts. Elle permet de mieux planifier ces travaux et d'augmenter la sécurité des ouvriers par un pronostic sur ce qui va se passer dans les deux heures qui viennent. S'il y a risque de pluie, les ouvriers n'ont pas besoin de se rendre sur le lieu d'intervention et ainsi ils ne se déplacent pas pour rien.

Il est envisagé par la DDE Seine-Saint-Denis d'utiliser la prévision radar en service opérationnel pour ces deux tâches à partir de l'été 1988.

9.3.2. L'utilisation pour le simulateur

Dans le simulateur, on va mettre à l'épreuve la prévision radar sur un grand nombre d'événements pour plus tard l'inclure dans le système de gestion en temps réel. Les tests vont notamment viser à analyser la fiabilité et à quantifier les marges d'erreur du modèle en fonction des caractéristiques de la situation météorologique.

Ces tests vont aussi permettre de quantifier la différence entre l'utilisation des mesures des pluviographes et celles du radar pour déterminer les lames d'eau.

A la fin de ces tests, sera précisée la façon d'implanter la prévision dans certaines parties du système en temps réel.

Il faut notamment toujours tenir compte des défaillances possibles (données bruitées,...) et des marges d'erreurs probables (selon les situations météorologiques). Ensuite, il faut décider quels seront les meilleurs messages à sortir aux utilisateurs et aux modèles hydrologiques, dans quel cas on préfère les données pluviographiques,...

Un autre résultat sera une meilleure connaissance des voies de développement les plus prometteuses : nous en avons déjà mentionné quelques-unes (une meilleure formalisation des critères de couplage en tenant compte de la situation météorologique, une étude sur la bonne utilisation d'un outil croissance/décroissance d'échos,...).

CONCLUSION

Résumé du rapport

Après une brève introduction, nous avons revu les méthodes de prévision existantes.

Ensuite, nous avons présenté les éléments d'une méthode susceptible de mieux décrire les phénomènes que nous cherchons à modéliser. Nous avons notamment exposé deux caractéristiques inédites de ces méthodes : le couplage hiérarchique dans son contexte de classification automatique et la sélection d'un niveau d'intensité de pluie supérieur pour se concentrer sur les parties qui sont hydrologiquement importantes.

Ensuite, on a montré que ces caractéristiques inédites permettent de prendre en compte l'influence de certains facteurs limitant l'efficacité de la prévision (ou simplement la reconnaissance d'échos). Ces réflexions ont directement été utilisées dans une nouvelle méthode de prévision, appelée scout II.O.

Nous avons proposé une comparaison entre cette méthode et des méthodes de référence (triviales ou couramment opérationnelles) sur un échantillon test.

La performance de chacune de ces méthodes a été mesurée par plusieurs critères, ceux habituellement utilisés en prévision météorologique et d'autres, plus adaptés à l'hydrologie, et notamment à la gestion d'un réseau d'assainissement.

Une comparaison détaillée sur 94 images et une comparaison globale sur 1068 images ont montré la fiabilité de cette nouvelle méthode pour la prévision hydrologique. La pluie la plus importante observée ces quatre dernières années en région parisienne a été étudiée particulièrement.

De plus, deux paramètres, liés seulement à la structure de l'image, peuvent servir d'indice de fiabilité calculable a priori de chaque prévision scout II.O.

Finalement, la méthode scout II.O a été implantée sur les ordinateurs du service départemental d'assainissement de Seine-Saint-Denis.

Conclusion générale

Cette thèse a démontré que la reconnaissance des formes est un outil théorique capable de fournir un cadre utile à la mise en place d'une prévision radar des pluies hydrologiquement significatives.

En effet, la reconnaissance des formes introduit en sus de l'analyse des données (qui s'identifierait ici au traitement d'images, car elle s'effectuerait sur une seule image) la recherche de structures permanentes s'approchant de ce que les météorologues appellent des "cellules pluvieuses". Les deux principaux mécanismes de reconnaissance de ces cellules pluvieuses, qui ont été introduits de manière originale dans cette thèse, sont

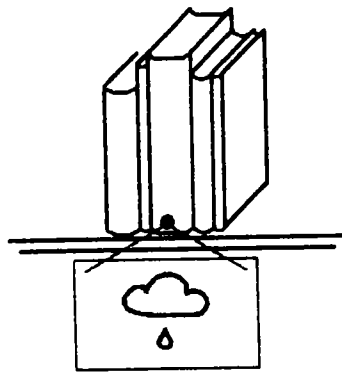
- la recherche du niveau d'intensité de pluie à partir duquel une cellule est identifiable comme telle dans un environnement météorologique donné (front, ligne de grain, ...)
- la permanence d'une image sur l'autre d'une structure regroupant des échos (structures connexes) proches (algorithme dit de couplage hiérarchique).

Ces propriétés ont été dérivées de la perception qu'en a un observateur d'images radar, disposant d'informations météorologiques complémentaires (champ de vent notamment).

Le modèle de prévision développé, scout II.0, méthode intuitive et fiable pour la prévision en hydrologie urbaine, n'est toutefois pas parfait et notamment il ne permet pas d'identifier les cycles de croissance et de décroissance des cellules pluvieuses. Or cet élément est essentiel pour faire franchir un bond important à ce type de méthode de prévision par rapport aux méthodes de prévision opérationnelles. Il semble donc opportun de poursuivre la recherche de nouvelles propriétés de cellules pluvieuses qui permettront d'accroître le taux de leur reconnaissance et d'identifier leur cycle de croissance/décroissance. Sans doute des mécanismes dérivés de l'apprentissage automatique autoriseront-ils de réels progrès dans ce domaine.

L'utilisation opérationnelle de scout II.0 va être expérimentée prochainement sur le réseau départemental d'assainissement de Seine-Saint-Denis. On en attend une augmentation de la sécurité du personnel d'intervention et une meilleure surveillance du réseau d'assainissement dans des situations dangereuses, ce qui donne une meilleure protection à la population du département de Seine-Saint-Denis.

BIBLIOGRAPHIE



- (1) P.R. Ahnert et al. : "Validation of the 'on-site' Precipitation Processing System for NEXRAD",
22nd Conf. on Radar Meteorology, Zuerich, Sept. 1984
- (2) H. Andrieu : "Le Radar Meteorologique et la Determination des Intensites pluvieuses",
These de doctorat d'ingenieur, CERGRENE/ENPC, Paris, 1986
- (3) H. Andrieu et al.: "Les Debuts de l'Utilisation du Radar Meteorologique en Hydrologie Urbaine", 1985
- (4) G.L. Austin : "Application of Pattern Recognition and Extrapolation Techniques to Forecasting",
ESA Journal, Vol. 9, 1985
- (5) G.L. Austin, A. Bellon : "The Use of Digital Weather Radar Records for Short-Term Precipitation Forecasting",
Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 100, pp. 658 - 664, 1974
- (6) P.M. Austin, R.A. Houze : "Analysis of the Structure of Precipitation Patterns in New England",
Journal of Appl. Met. 11, pp. 926-935, 1972
- (7) A. Bachoc : "Pour commencer a automatiser la gestion du reseau d'assainissement en Seine-Saint-Denis... - Disons Douze Ans!"
Departement de la Seine-Saint-Denis, 1984
- (8) P.E. Barclay, K.E. Wilk : "Severe Thunderstorm Radar Echo Motion and Related Weather Events Hazardous to Aviation Operations",
ESSA Techn. Memo., NSSL, June 1970
- (9) A. Bellon : Correspondance personelle
- (10) A. Bellon, G.L. Austin : "The Evaluation of Two Years of Real-Time Operation of a Short-Term Precipitatio Forecasting Procedure (SHARP)",
J. Appl. Met. 17, No. 12, pp. 1778 - 1787, 1978
- (11) A. Bellon, G.L. Austin : "The Accuracy of Short-Term Radar Rainfall Forecasts",
Journal of Hydrology, 70, 1984
- (12) A. Bellon, G.L. Austin : "On the Relative Accuracy of Satellite and Raingauge Rainfall Fields",
XIX CMOS Congress, Montreal, June 1985
- (13) C.J. Bjerkaas, D.E. Forsyth : "An Automated Real-Time Storm Analysis and Storm Tracking Program",
Air Force Geophysics Laboratory, Oct. 1980
- (14) R.H. Blackmer, et al. : "Application of Pattern Recognition Techniques to Digitized Weather Radar Data ",
Stanford Research Institute, Menlo Park, California,
Report No. 36072, 1973

- (15) Boucher, Wexler : "The Motion and Predictability of Precipitation Lines",
Journal of Appl. Met. 18, pp. 160-171, 1961
- (16) L.J. Breuer : "Anmerkungen zue Erforschung von Niederschlagsstrukturen mit elektronischen Pulsmessgeraeten",
Kleinheubacher Berichte, 19, FTZ, Darmstadt, 235-250, 1976
- (17) K.A. Browning : "The FRONTIERS plan : A strategy for using radar and satellite imagery for very-short-range precipitation forecasting",
Met. Magazine, Vol. 108, June 1979
- (18) K.A. Browning : "Maximizing the Usefulness of Rainfall Data from Radars",
Nowcasting Symposium at 3rd Assembly of IAMAP, Hamburg, 1981
- (19) K.A. Browning : "Conceptual Models of Precipitation Systems",
ESA Journal, 1985
- (20) K.A. Browning, J. Mason : "Air Motion and Precipitation Growth in Frontal Systems",
Met. Office RRL, Research Report No. 19, 1980
- (21) K.A. Browning et al. : "On the Forecasting of Frontal Rain Using a Weather Radar Network",
Meteorological Office, Research Report No. 22, Malvern, England, 1980
- (22) D.A. Brunkow : "A Digital Radar-based Rainfall Monitoring and Forecasting Tool",
19th Conf. on Radar Meteorology, Miami, 1980
- (23) K.M. Carpenter, R.G. Owens : "Use of Radar Network Data for Forecasting Rain",
Internal Report, Radar Research Lab. Malvern, England, 1981
- (24) Chalon : "Dynamique des Nuages Convectifs - Influence du cisaillement de vent sur l'evolution des Cumulonimbus",
La Meteorologie, VIe serie, No. 13, 1978
- (25) N. Charef : "Traitement des images radar sur un array processeur FPS 5205",
D.E.A., CERGRENE, ENPC, 1987
- (26) M. Ciccione, V. Pircher : "Preliminary Assessment of very Short-Term Forecasting of Rain from Single Radar Data",
Proc. Nowcasting Symposium, Norrkoepping, Sweden, 1984
- (27) J.L. Clarke, C.G. Collier : "Assessment of a real-time method for reducing errors in radar rainfall measurements due to bright band",
Meteorological Office, Report No. 3, 1977

- (28) P.R. Cohen, E.A. Feigenbaum : "The Handbook of Artificial Intelligence", Vol. III, Addison-Wesley, 1986
- (29) C.G. Collier : "On the benefits of improved short period forecasts of precipitation to the United Kingdom - non military applications only", Meteorological Office, Research Report No. 6, Malvern, England, Dec. 1977
- (30) C.G. Collier : "Objective Forecasting Using Radar Data : A Review", Meteorological Office, Research Report No. 9, Malvern, England, April 1978
- (31) C.G. Collier : expose au Weather Radar and Flood Warning Symposium, Lancaster, England, 16 - 18 Sept 1985
- (32) C.G. Collier : "Accuracy of Rainfall Estimates by Radar Part I: Calibration by Telemetering Raingauges", Journal of Hydrology, No. 83, p 207 - 223, 1986a
- (33) C.G. Collier : "Accuracy of Rainfall Estimates by Radar Part II: Comparison with Raingauge Network", Journal of Hydrology, No. 83, p 225 - 235, 1986b
- (34) C.G. Collier, P.R. Larke : "A Procedure for the Adjustment in Real-Time of Radar Measurements of Surface Rainfall", Meteorological Office, Research Report No. 25, Malvern, England, July 1981
- (35) C.G. Collier, et al. : "A Weather Radar Correction Procedure for Real-Time Estimation of Surface Rainfall", Quart. J. R. Met. Soc. 109, pp. 589 - 608, 1983
- (36) V.K. Collinge : "The Development of Weather Radar in the U.K.", Symposium on Weather Radar and Flood Forecasting, Lancaster, England, Sept. 1985
- (37) M. Coster, J.L. Chermant : "Precis d'analyse d'images", Editions CNRS, Paris, 1985
- (38) R.K. Crane : "Rain Cell Detection and Tracking", 17th Conf. on Radar Meteorology, Seattle, 1976
- (39) C. Damant, et al. : "Radar Rain Forecasting for Wastewater Control", J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 109, No. 2, pp. 293 - 297, Feb. 1983a
- (40) C. Damant et al.: "Errors in the Thiessen Technique for Estimating Areal Rain Amounts Using Weather Radar Data", Journal of Hydrology, 62, 1983b

- (41) T. Denoeux : "Rapport de stage effectue a l'etablissement d'etudes et de recherches de la Meteorologie Nationale",
CERGRENE, mars 1986
- (42) T. Denoeux : "Evaluation des performances d'une methode simple de prevision de pluie par radar.
Influence de quelques parametres meteorologiques",
Rapport intermediaire, CERGRENE, Nov. 1986
- (43) T. Denoeux : "Evaluation des performances d'une prevision radar en vue d'application a l'hydrologie urbaine",
CERGRENE - Plan Urbain, Convention No. 84 31395 00 223 75 01,
Paris, janvier 1988
- (44) E. Diday : "The dynamic Cluster Method an sequentialization in non-hierarchical Clustering",
Proceedings of the 1st IJCPR, 1974
- (45) V. DiGesù, M.C. Maccarone : "Description of Fuzzy Objects by Convex Hull Techniques",
1986
- (46) G. Dumoulin : "Mesures des intensites des precipitations par le radar",
Sodetep (Societe d'etudes techniques des precipitations),
April 1963
CERGRENE bibl.no. 990
- (47) T. Einfalt : "Moeglichkeiten der Verfolgung radargemessener Niederschlaege bei Einschraenkungen im Rechenzeit- und Speicherplatzbedarf",
Diplomarbeit, Institut fuer Informatik und Institut fuer Wasserwirtschaft, Universitaet Hannover, Nov. 1983
- (48) T. Einfalt, W. Schilling : "SSCOUT - A Storm Tracking Procedure for a Microcomputer",
Third Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Goeteborg, Sweden,
June 1984
- (49) T. Einfalt et al. : "Four Radar Research Centres in North America",
CERGRENE / Meteorologisches Institut Bonn, rapport interne, 1987
- (50) R.C. Elvander : "An Evaluation of the Relative Performance of Three Weather Radar Echo Forecasting Techniques",
17th Conf. on Radar Meteorology, Seattle, 1976
- (51) H. Emptoz : "Modele Pretopologique pour la Reconnaissance des Formes - Applications en Neurophysiologie",
These de Doctorat, No. d'ordre 83-18, Lyon, 1983
- (52) R.M. Endlich, et al. : "Use of a Pattern Recognition Technique for Determining Cloud Motions from sequences of Satellite Photographs",
J. Appl. Met. 10, pp. 105 - 117, 1970

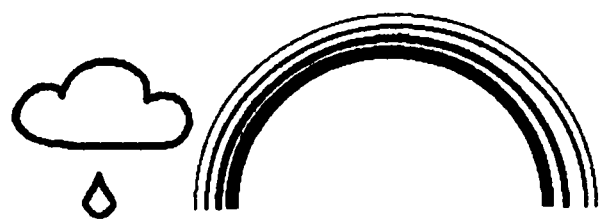
- (53) N. Foroud et al.: "The Effects of a Moving Rainstorm on Direct Runoff Properties",
Water Resources Association, Vol. 20, No.1, Feb. 1984
- (54) FPS 5000 Manual,
Floating Point Systems, Inc., 1985
- (55) H. Freeman : "Boundary Encoding and Processing ",
dans: Picture Processing and Psychoptorics, B.S. Lipkin et
A. Rosenfeld Eds., Academic Press, N.Y., 1970
- (56) M.H. Gandelin, M. Thonnat : "Etude pour L'automatisation de la
Reconnaissance d'Organismes Zooplanctoniques a l'aide d'un
Systeme Expert",
Symposium AFCET-RFIA, Antibes, nov. 1987
- (57) C. Granger : "Fuzzy Reasoning in a Knowledge Based System for Object
Classification",
INRIA, Centre de Rocquencourt, 78153 Le Chesnay Cedex, 1986
- (58) V.K. Gupta, E.C. Waymire : "A Stochastic Kinematic Study of
Subsynoptic Space-Time Rainfall",
Water Resources Research 15 (3), pp. 637-644, 1979
- (59) T.W. Harrold : "Rainfall Forecasts in the United Kingdom using
Radar Data",
Water Resources Centre ,Chester and Royal Radar Establishment,
Malvern, England, Dec. 1976
- (60) T.W. Harrold, P.G. Kitchingman : "Measurement of Surface Rainfall
Using Radar when the Beam Intersects the Melting Layer",
Preprint Vol. 16th Radar Meteorology Conference, Am. Met.
Soc., Boston, USA, 1975
- (61) R.W. Hockney, C.R. Jesshope : "Parallel Computers",
Adam Hilger, Bristol, 1981
- (62) L. Hubert : "A set theoretical approach to the problem of
hierarchical clustering",
J. of Math. Psycho., 1977
- (63) F.A. Huff : "Radar Analyses of Urban Effects on Rainfall",
17th Conf. on Radar Meteorology, Seattle, 1976
- (64) F.A. Huff et al.: "Convective Rain Monitoring and Forecasting System
for an Urban Area",
19th Conf. on Radar Meteorology, Miami, 1980
- (65) F.A. Huff et al. : "Real-Time Rainfall Monitoring - Prediction
System and Urban Hydrology Operations",
ASCE J. of Water Resources Planning WR2, p.419-35, 1981

- (66) K. Hwang, F.A. Briggs : "Computer Architecture and Parallel Processing",
McGraw-Hill, New York, 1985
- (67) G. Jacquet : "Mise a jour du programme de mise en place du logiciel d'aide a la conduite",
Plan Urbain / DDE Seine St Denis, Mars 1986
- (68) G. Jacquet : "Definition sommaire de l'architecture materiel et logiciel attachee a l'utilisation des images radar",
Document No. 20, Marche 8502049, CERGRENE, 1987
- (69) G. Jacquet et al. : "Interet technique et economique des radars d'investigation des precipitations en matiere d'assainissement urbain",
La Houille Blanche, No. 5/6, 1983
- (70) D. Kibler, P. Morris : "Don't be stupid",
Proc. of the 7th IJCAI, Vancouver, Canada, p. 345 - 7, 1981
- (71) P. Lannuzel : "Programmes d'apprentissage automatique",
Document de travail, CERGRENE, mai 1987
- (72) R.E. Lopez et al. : "Population Characteristics, Development Processes and Structure of Radar Echoes in South Florida",
Monthly Weather Review, Vol.112, 1984
- (73) G. Matheron : "Random Sets and Integral Geometry",
J. Wiley, 1975
- (74) M.C. McCoy : "Severe-Storm-Forecast Results from the PROFS 1983 Forecast Experiment",
Bull. Am. Met. Soc., Vol.67, No. 2, pp. 155 ff, 1986
- (75) E.L. Neff : "How much Rain does a Raingage gage?",
J. of Hydrology 35, pp. 213 - 220, 1977
- (76) NEXRAD Joint System Program Office: "Next Generation Weather Radar Algorithm Report",
Dec. 1985
- (77) S.S. Ostlund : "Computer Software for Rainfall Analysis and Echo Tracking of Digitized Radar Data",
Techn. Memo ERL WMP0-15, NOAA, Boulder, Colorado, 1973
- (78) E.A. Pani, D.R. Haragan : "Storm Characteristics of Convective Scale Precipitation",
Water Rec. Bull. Vol. 21, No. 3, 1985
- (79) W.K. Pratt : "Digital Image Processing",
J. Wiley, 1978

- (80) I. Rodriguez-Iturbe, P.S. Eagleson : "Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time",
Water Resources Research, Vol. 23, No.1, 1987
- (81) A. Rosenfeld, A.C. Kak : "Digital Picture Processing",
2 Volumes, Academic Press, 1982
- (82) Rousseau : "Controle des Previsions - Partie II: Verification des
Previsions de l'Occurrence d'un Phenomene - Application aux
Previsions de Precipitations",
Note de l'EERM, 1980
- (83) RTCUDS : "Real-Time Control of Urbain Drainage Systems -
The State-of-the-Art",
RTCUDS Phase I Report, Ed. W. Schilling, IAWPRC/IAHR Joint
Committee on Urban Storm Drainage, August 1987
- (84) G.P. Sargent : "The FRONTIERS Project",
Weather Radar and Flood Warning Symposium, Lancaster,
England, 16 - 18 Sept 1985
- (85) W. Schilling : "Operatioinelle Niederschlagsvorhersagen mit
empirisch identifizierten Modellen und optimaler
Zustandsschaetzung",
Dissertation, Universitaet Hannover, Feb. 1983
- (86) W. Schilling : "Effect of Spatial Rainfall Distribution on Sewer
Flows",
Water Sci. Technol. 16, 819, pp. 177, 1984
- (87) R.J. Serafin, R. Carborne : "Status and Trends in Radar Meteorology
in the United States: 1984",
22nd Conf. on Radar Meteorology, Zuerich, Sept. 1984
- (88) J. Serra : "Image Analysis and Mathematical Morphology",
Academic Press, 1982
- (89) J.-C. Simon : "La reconnaissance des formes par algorithmes",
Masson, Paris, 1984
- (90) C.J. Smith : "The Reduction of Errors caused by Bright Band in
Quantitative Rainfall measurements made Using Radar",
to appear in: Journal of Atmosphere and Ocean Tech. (1986)
- (91) A.H. Thiessen : "Precipitation for Large Areas",
Monthly Weather Review, 39, 1911
- (92) J.P. Triplet, G. Roche : "Meteorologie generale",
Ecole Nationale de la Meteorologie, 1977
- (93) A.A. Tsonis, G.L. Austin : "An Evaluation of Extrapolation Techniques
for the Short-Term Prediction of Rain Amounts",
Atmosphere-Ocean 19 (1), 1981

- (94) S.V. Vasiloff, E.A. Brandes : "An Investigation of the Transition from Multicell to Supercell Storms",
22nd Conf. on Radar Meteorology, Zuerich, Sept. 1984
- (95) M. Volle : "Analyse des donnees",
Economica, Paris, 1981
- (96) M.L. Walton, E.R. Johnson : "An Improved Precipitation Projection Procedure for the NEXRAD Flash-Flood Potential System",
23rd Conf. on Radar Meteorology, Snowmass, Sept. 1986
- (97) V. Wiggert et al. : "Computerized rain assessment and Tracking of South Florida Weather Radar Echoes",
Bull. Am. Met. Soc., 56, 1975
- (98) J.W. Wilson : "Movement and Predictability of Radar Echos",
ESSA Techn. Memo No. NSSL-28, Norman, Oklahoma, 1966
- (99) J.W. Wilson, E.A. Brandes : "Radar Measurement of Rainfall - A Summary",
Bull. of the Am. Met. Soc., Vol. 60, No.9, Sept. 1979
- (100) T. Winograd : "Understanding Natural Language",
MIT, Acad. Press, 1971
- (101) D.E. Wolf et al. : "Experiments in Automatic Cloud Tracking, Using SMS-GOES Data",
J. Appl. Met. 16, pp. 1219 - 1230, 1977
- (102) F. Yoshino, D. Kozeki : "Study on Short-Term Forecasting of Rainfall Using Radar Rain-Gauge",
Hydrology Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan, June 17, 1985, presented at:
Weather Radar and Flood Warning Symposium, Lancaster, England, 16 - 18 Sept 1985
- (103) I. Zawadski : "Factors Affecting the Prevision of Radar Measurements of Rain",
22nd Conf. on Radar Meteorology, Zuerich, Sept. 1984

LES ANNEXES



1 - STOCKAGE DES CARACTERISTIQUES

Sont présentées les manières de stockage pour chaque écho dans un vecteur FEAT.

2 - TABLEAUX DES RESULTATS

Sont présentées les résultats des 7 événements de base, étudiées en détail dans le chapitre 8.

3 - QUELQUES DETAILS SUR L'UTILISATION DES DONNEES

Sont expliquées les manières d'utilisation du programme (fichiers, structure des images, paramètres de gestion du programme, ...)

4 - LA LIGNE DE GRAINS DU 7 JUIN 1987

Article du journal "Le Monde" du 10 juin 1987

5 - DESCRIPTION MATHEMATIQUE D'OBJETS

Rappel de la base de la morphologie mathématique. Exemple d'une description microscopique d'une forme

6 - CAPPI ET BANDE BRILLANTE

Sont traités deux phénomènes techniques liés au radar dont l'explication n'était pas possible dans le texte. Il s'agit du CAPPI et de la bande brillante

ANNEXE 1

STOCKAGE DES CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques de chaque écho sont stockées dans un vecteur des attributs (feat) de la manière suivante:

```

c
c feat(1,k) - )
c feat(2,k) - ) coordonnées du centre de gravité
c feat(3,k) - Jmax (moment d'inertie maximal)
c feat(4,k) - Jmin (moment d'inertie minimal)
c feat(5,k) - taille de nuée k
c feat(6,k) - )
c feat(7,k) - ) vecteur ancien (pour 60 minutes calculé !)
c feat(8,k) - compteur des identifications
c feat(9,k) - Ja (quotient de Jmax et Jmin)
c feat(10,k) - angle de Jmax
c feat(11,k) - masse de nuée k
c feat(12,k) - nombre des bons tracings de l'écho
c feat(13,k) - pourcentage de l'intensité 1 dans l'écho k
c
c ;
c feat(27,k) - pourcentage de l'intensité 15 dans l'écho k
c feat(28,k) - futur partenaire de l'écho
c feat(29,k) - -1 = débasse
c
c           i = partenaire 1 --- et
c           partenaire 2 xxx--- des associations
c
c           -0.1 = identifié est l'association au dessus, k est une feuille
c           0 = autrement
c
c feat(30,k) - dmin positif - valide
c           négatif - utilise pour associations
c feat(31,k) - i , partenaire de la distance minimale
c feat(32,k) - j , noeud au dessus de k
c feat(33,k) - 1 , si la distance entre bord et centre est plus petite
c           que racine(taille)
c
c
c la boucle 10 calcule tous les caractéristiques des échos, lorsque boucle 20
c est fait pour le calcul des caractéristiques des échos unis à partir des
c caractéristiques déjà calculées.
c en outre, les échos unis sont purement artificiels dans le sens qu'ils sont
c ni stockés dans clz ni dans z. les associations se font jusqu'à la distance
c maximale de 50.
c

```

Connaissant le numéro de chaque écho, on peut alors facilement accéder à ses caractéristiques et ses éléments.

Les caractéristiques d'une suite d'images comme le mouvement moyen ou ce mouvement moyenné sur cinq images avec ses écart-types est à trouver dans le vecteur HY:

A 5

ANNEXE 2

Tableau des Résultats

Evénement du 21/06/84

Nombre d'images : 6

Durée de la séquence : 1 heures 15 minutes

Echéance : 1 image

Intensité moyenne 1.0 mm/h

Caractère météorologique: front froid , bande

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.0 | scoutII.c |
|----------------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS- | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| dHS+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| dHS | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| dHS | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CSI | 8.96 | 20.37 | 23.02 | 19.31 | 22.54 | 22.54 |
| RI | 15.01 | 32.66 | 36.34 | 31.30 | 35.69 | 35.69 |
| CC | 76.79 | 82.11 | 82.10 | 81.87 | 81.55 | 81.12 |
| V _x | 0 | 11 | 14 | 15 | 15 | 15 |
| V _y | 0 | 1 | 0 | 0 | -2 | -2 |

Tableau des Résultats

Evénement du 13/7/84

Nombre d'images : 12

Durée de la séquence : 5 heures 45 minutes

Echéance : 1 image

Intensité moyenne 2.0 mm/h

Caractère météorologique: instabilité

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.O | scoutII.c |
|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS | 1.97 | 1.94 | 1.74 | 1.55 | 1.59 | 1.68 |
| dHS* | 1.70 | -1.50 | 1.33 | 1.32 | 1.09 | 0.93 |
| dHS | -1.92 | -1.87 | -1.08 | -1.12 | -1.17 | -0.99 |
| dHS | 1.97 | 1.93 | 1.65 | 1.52 | 1.51 | 1.48 |
| CSI | 6.23 | 7.30 | 18.95 | 25.16 | 26.39 | 25.97 |
| RI | 7.31 | 9.24 | 26.99 | 36.69 | 37.90 | 37.38 |
| CC | 7.32 | 10.27 | 29.32 | 40.79 | 39.00 | 36.20 |
| V_x | 0 | 45 | 35 | 29 | 27 | 27 |
| V_y | 0 | 5 | 2 | -1 | -2 | -2 |

Tableau des Résultats

Evénement du 05/09/84
 Nombre d'images : 23
 Durée de la séquence : 5 heures 30 minutes
 Echéance : 1 image
 Intensité moyenne 1.6 mm/h
 Caractère météorologique: traîne , forte instabilité

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.0 | scoutII.c |
|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS- | 1.44 | 1.31 | 1.07 | 1.06 | 1.04 | 1.10 |
| dHS+ | 0.82 | 0.79 | 0.78 | 0.78 | 0.80 | 0.80 |
| dHS | -1.34 | -1.15 | -0.65 | -0.72 | -0.70 | -0.65 |
| dHS | 1.41 | 1.27 | 1.00 | 1.01 | 1.00 | 1.03 |
| CSI | 13.02 | 19.17 | 40.01 | 39.62 | 40.92 | 39.83 |
| RI | 17.93 | 26.51 | 54.19 | 53.88 | 55.13 | 53.91 |
| CC | 18.10 | 27.05 | 56.54 | 54.90 | 56.39 | 54.42 |
| V_x | 0 | 11 | -2 | -3 | -2 | -2 |
| V_y | 0 | -7 | -15 | -16 | -16 | -16 |

Tableau des Résultats

Evénement du 10/09/84

Nombre d'images . 6

Durée de la séquence : 1 heure 30 minutes

Echéance : 1 image

Intensité moyenne 2.96 mm/h

Caractère météorologique: traîne , forte instabilité

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.0 | scoutII.c |
|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS- | 2.62 | 2.52 | 2.08 | 2.14 | 2.10 | 2.24 |
| dHS+ | 2.37 | 2.66 | 2.45 | 2.29 | 2.70 | 2.68 |
| dHS | -2.00 | -1.69 | -0.68 | -0.90 | -0.60 | -0.18 |
| dHS | 2.59 | 2.54 | 2.19 | 2.18 | 2.29 | 2.42 |
| CSI | 16.27 | 21.55 | 39.68 | 38.15 | 37.93 | 37.10 |
| RI | 18.84 | 27.86 | 51.51 | 49.62 | 49.03 | 48.02 |
| CC | 27.14 | 35.51 | 59.90 | 57.41 | 59.99 | 55.64 |
| V_x | 0 | 37 | 24 | 19 | 23 | 23 |
| V_y | 0 | -31 | -22 | -18 | -21 | -21 |

Tableau des Résultats

Evénement du 01/10/84

Nombre d'images : 7

Durée de la séquence : 1 heures 45 minutes

Echéance : 1 image

Intensité moyenne 2.5 mm/h

Caractère météorologique: front chaud , bande large

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.0 | scoutII.c |
|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS- | 0.88 | 0.80 | 0.77 | 0.90 | 0.81 | 0.81 |
| dHS+ | 0.90 | 0.82 | 0.78 | 0.93 | 0.82 | 0.82 |
| dHS | -0.08 | -0.10 | -0.06 | -0.13 | -0.12 | -0.12 |
| dHS | 0.89 | 0.81 | 0.77 | 0.91 | 0.81 | 0.81 |
| CSI | 85.59 | 89.50 | 89.32 | 87.02 | 89.12 | 89.12 |
| RI | 80.08 | 86.88 | 86.33 | 81.93 | 86.31 | 86.31 |
| CC | 90.15 | 91.41 | 91.86 | 89.26 | 91.51 | 91.51 |
| V_x | 0 | 28 | 19 | 21 | 23 | 23 |
| V_y | 0 | 9 | 6 | 13 | 10 | 10 |

Tableau des Résultats

Evénement du 24/10/84

Nombre d'images : 25

Durée de la séquence : 6 heures

Echéance : 1 image

Intensité moyenne 1.3 mm/h

Caractère météorologique: front chaud , zone
de précipitation

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.0 | scoutII.c |
|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS- | 1.09 | 0.63 | 0.48 | 0.75 | 0.52 | 0.55 |
| dHS+ | 0.11 | 0.18 | 0.17 | 0.16 | 0.16 | 0.15 |
| dHS | -1.03 | -0.47 | -0.23 | -0.67 | -0.43 | -0.40 |
| dHS | 1.04 | 0.54 | 0.36 | 0.70 | 0.47 | 0.46 |
| CSI | 22.20 | 43.08 | 57.42 | 46.93 | 54.77 | 54.68 |
| RI | 29.48 | 54.92 | 69.69 | 60.26 | 68.60 | 68.53 |
| CC | 31.53 | 56.61 | 71.30 | 60.24 | 69.36 | 68.89 |
| V_x | 0 | 21 | 38 | 35 | 38 | 38 |
| V_y | 0 | 7 | 11 | 6 | 7 | 7 |

Tableau des Résultats

Evénement du 08/11/84

Nombre d'images : 15

Durée de la séquence : 4 heures

Echéance : 1 image

Intensité moyenne 2.4 mm/h

Caractère météorologique: front froid , ligne de convection

| | pers | vent | bics | scoutII | scoutII.0 | scoutII.c |
|----------------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|
| dHS- | 1.39 | 1.69 | 1.16 | 1.36 | 1.13 | 1.15 |
| dHS+ | 1.16 | 1.38 | 1.13 | 1.15 | 1.11 | 1.05 |
| dHS | -0.68 | -1.27 | -0.29 | -0.80 | -0.31 | -0.34 |
| dHS | 1.33 | 1.65 | 1.15 | 1.31 | 1.12 | 1.11 |
| CSI | 61.27 | 45.55 | 74.61 | 60.44 | 75.14 | 75.14 |
| RI | 69.27 | 51.67 | 80.78 | 68.01 | 81.33 | 81.33 |
| CC | 72.55 | 53.10 | 83.27 | 71.24 | 84.15 | 83.95 |
| V _x | 0 | -11 | 16 | 0 | 21 | 21 |
| V _y | 0 | 55 | 44 | 23 | 49 | 49 |

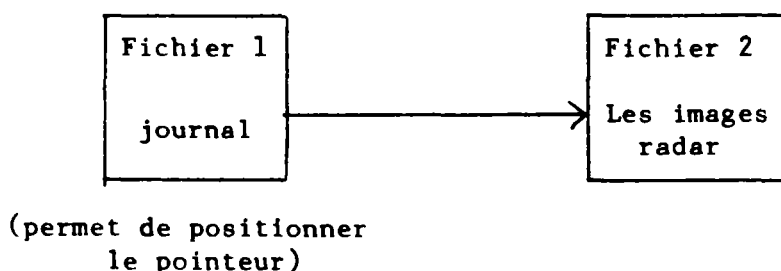
ANNEXE 3

QUELQUES DETAILS SUR L'UTILISATION DES DONNEES

a) Fichiers

L'information radar est stockée sur deux fichiers:

- 1) un fichier représentant un journal des images, qui sert d'accès au fichier de stockage des données de réflectivités proprement dites.
- 2) le fichier de stockage des données de réflectivités, image par image.

Structure du fichier 1 (journal des images pour un événement)

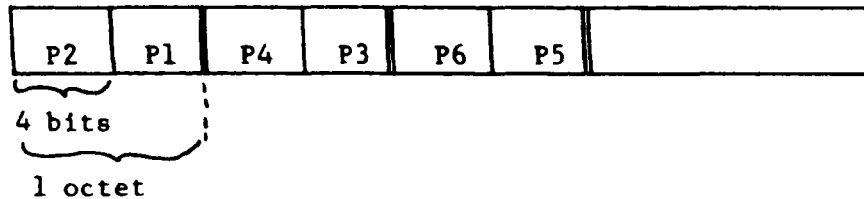
Le fichier 1 est un fichier séquentiel qui contient dans l'ordre les informations suivantes :

- 1) le numéro de l'image : format (xxxxx)(=format I5)
- 2) le numéro de jour : format (xx)(=format I3)
- 3) le numéro de mois : format (xx)(=format I3)
- 4) le numéro de l'année : format (xxxx)(=format I3)
- 5) le numéro de l'heure : format(xx)(=format I3)
- 6) le numéro de minute : format (xx)(=format I3)
- 7) les centaine, dizaine, unité et dixième du site : format 4(xx)
- 8) les numéros de réflectivité : format 15.(xx)
- 9) les résolutions en x et y : format 2(xx)

Structure du fichier 2

- . le fichier 2 contient les images en format "standard".
- . c'est un fichier binaire, en accès direct, non compacté, type de donnée : données-caractère.
- . les images radar sont enregistrées sous la forme cartésienne de 256 lignes sur 256 colonnes, chaque pixel étant codé sur 4 bits. Un enregistrement se compose de 16 blocs de 2048 octets suivis de 1 EOF.

Chaque block contient 16 lignes de 256 pixels, chaque octet contenant 2 pixels inversés :



Pi : pixel n°i

. la première ligne de l'image est surimprimée par un en-tête (redondance de l'information d'accès si le fichier 1 est perdu ; perte de l'information sur la lère ligne des réflectivités).

Structure de l'en-tête

Les 4 bits de droite des octets n° 10 à 23 (inclus) contiennent respectivement :

- les dizaines du jour
- les unités du jour
- les dizaines du mois
- les unités du mois
- les dizaines de l'année
- les unités de l'année
- les dizaines de la minute
- les unités de la minute
- (les dizaines de la seconde) }
- (les unités de la seconde) } non pris en compte ultérieurement
- les centaines du site
- les dizaines du site
- l'unité du site
- le dixième du site

Le premier fichier (le journal) est le fichier [CERGRENE.RADAR.DON]images.dat .

Les 1068 images du radar de Trappes se trouvent enregistrées dans le fichier [CERGRENE.RADAR]malm.dat, dont l'accès est direct. Pour l'ouvrir on utilise alors

```
OPEN (iunit, FILE = 'MALM.DAT', READONLY, RECL = 2048,
ACCESS = 'DIRECT', FORM = 'FORMATTED')
```

Cela donne le programme de lecture suivant:

```
if (nfl) then
  if (inn .gt. 1068) return
  if (index .ne. 1) then
    do j = 1,16
      read(7'(inn-1)*16+j,1100)(tab1(i), i=1,2048)
      do k = 1,16
        do i = 1,128
          ix = ichar(tab1((k-1)*128 + i))
          iy = ix / 16
          if (index .eq. 0) then
            a((j-1)*16+k, 2*i) = iy
            a((j-1)*16+k, 2*i-1) = ix - iy*16
          else
            nn((j-1)*16+k, 2*i) = iy
            nn((j-1)*16+k, 2*i-1) = ix - iy*16
          endif
        enddo
      enddo
    enddo
```

b) Choix conversationnel

Dans le module conversationnel d'initialisation on a le choix entre un nombre de différents modes de calcul:

- format des données (deux possibilités)
- nom de fichier des données
- sélection des données par
 - * date --> entrée du date
 - * no. du record --> entrée du no.
- le pas de temps de la base de prévision en images
- prévision sur
 - * une échéance fixe en minutes --> minutes
 - * une échéance fixe en images --> no. images
- choix de la zone pour le calcul des statistiques
- impression du resultat prévu
- mode hyéto (pas opérationnel)
- bouclage
 - * automatique --> no. de boucles
 - * arrêt après chaque prévision calculée
- nom du fichier des resultats
- choix de la méthode de prévision.

ANNEXE 4

LA LIGNE DE GRAINS DU 7 JUIN 1987

20 Le Monde • Mercredi 10 juin 1987 •

Catastrophes

Cinq morts et quatre disparus
après la tempête dans le Sud-Ouest

Cinq morts, quatre disparus, des dizaines d'embarcations coulées ou défoncées à terre, tel est le bilan provisoire de la tempête qui s'est abattue sur le Sud-Ouest, dimanche 7 juin, vers 17 heures.

D'Hendaye à La Rochelle, gendarmerie, sapeurs-pompiers et protection civile ont mobilisé un important dispositif de secours aériens et maritimes pour venir en aide aux embarcations. Les seuls gendarmes ont hélitreuillé trente personnes et ont assisté cent vingt bateaux. Cependant, une vingtaine d'embarcations n'avaient pas encore regagné leur port d'attache dimanche 8 juin.

Quatre parachutistes partis de l'aérodrome de La Teste (Gironde)

ont été pris dans la « ligne de grains » au cours de leur saut. Ils ont été précipités dans les arbres, et l'un d'entre eux souffre de fractures multiples.

Dans la nuit du 7 au 8 juin, trois cent mille foyers ont été privés d'électricité en Aquitaine. La région de Bayonne était la plus touchée avec les zones rurales de la Gironde. A 8 heures, mardi 8 juin, seize mille abonnés étaient encore privés de courant. Le centre régional d'EDF annonçait, cependant, que le raccordement au réseau serait terminé à la mi-journée pour la plupart d'entre eux.

Les dégâts agricoles ne sont pas encore évalués. Les cultures céréalières semblent avoir le plus souffert. — (Corresp.)

Une « ligne de grains » imprévisible

La très violente tempête qui a balayé le Sud-Ouest dans l'après-midi du 7 juin a été provoquée par le passage d'une « ligne de grains » et non par des tornades, comme l'a précisé la Météorologie nationale.

Chaque tornade, en effet, est un phénomène très limité dans le temps et l'espace : c'est un tourbillon de vents extrêmement forts qui joue le rôle d'un formidable aspirateur, se formant entre le sol et le base d'un très gros cumulo-nimbus. Ce tourbillon dépasse rarement la centaine de mètres de diamètre, il se déplace à 40 ou 60 kilomètres à l'heure et sa durée de vie se compte en quarts d'heure.

Sur une même région, plusieurs tornades s'organisent souvent en même temps et quand les unes disparaissent, d'autres naissent. Mais les dégâts, très considérables, sont limités aux étroits couloirs qu'a parcourus chaque tornade. Ce qui n'est pas le cas du désastre qui a frappé le Sud-Ouest.

Selon la Météorologie nationale, tout est venu d'un front froid — l'air était aux environs de 20°C — qui est arrivé sur une terre très chaude — la température au sol était de l'ordre de 28°C à 30°C depuis Biarritz jusqu'aux Charentes. L'air chaud proche du sol avait déjà tendance à monter en raison de sa température élevée.

Le contact avec l'air froid a brusquement produit une très forte instabilité de l'atmosphère avec formation d'une ligne d'énormes cumulo-nimbus d'orage. En moins d'une heure et demie, la situation météorologi-

que était mûre pour déclencher une catastrophe. Les radars et satellites météorologiques avaient bien eus l'arrivée du front froid mais n'y avaient détecté aucun signe de violence.

Des rafales
de 141 kilomètres à l'heure

Le désastre du 7 juin démontre, s'il en était besoin, les limites des prévisions météorologiques. Certes, les satellites et les ordinateurs ont fait faire, depuis une vingtaine d'années, des progrès considérables. On peut maintenant raisonnablement prévoir le temps à cinq jours. Mais, même à très courte échéance, la prévision comporte et comportera toujours des incertitudes dues au fait, d'une part, que des phénomènes très localisés peuvent avoir des répercussions sur une situation régionale, d'autre part, que les modèles de prévision ne peuvent rendre compte des phénomènes extrêmes qui peuvent survenir. En outre, l'océan Atlantique est dépourvu, bien évidemment, de postes d'observations météorologiques.

La Météorologie nationale n'a pas gardé le trace d'une « ligne de grains » aussi violente dans le passé. Certes, la côte d'Aquitaine est connue pour ses orages. Mais le 7 juin le vent a soufflé en rafale à 141 kilomètres à l'heure à Socos (vers 17 h 10), à 119 kilomètres à l'heure à Biscarosse et à 115 kilomètres à l'heure à Cazeaux et à Bordeaux (vers 17 h 25).

YVONNE REBEYROL.

ANNEXE 5

DESCRIPTION MATHEMATIQUE D'OBJETS

En reconnaissance des formes, d'autres outils existent et paraissent prometteurs pour traiter des tâches liées à l'imagerie radar. Deux parmi eux sont examinés ici. La partie 5.1 sera consacrée à la morphologie mathématique, dont on va surtout regarder les transformations d'érosion, de dilatation et de squelettisation. La partie 5.2 va brièvement rappeler le fonctionnement du codage de Freeman comme description microscopique d'une forme.

Pour notre application ces outils ont été écartés parce qu'ils auraient besoin de travailler sur les données brutes dans la partie de couplage.

5.1. La morphologie mathématique

La morphologie mathématique a été développée par J. Serra et G. Matheron (cf. J. Serra, 1982 ; G. Matheron, 1975; Coster/Chermant, 1985) pour comparer des objets. L'approche de base est la comparaison par forme, en utilisant éventuellement une transformation géométrique pour simplifier ou modifier les formes du départ.

Pour avoir une idée générale d'une telle transformation, nous regardons l'érosion et la dilatation d'un objet :

Soit E un espace métrique, $X \in E$ un ensemble connexe, $d(a,A)$ la distance entre un point et un ensemble et C un cercle du rayon c .

L'érosion de X par C est définie par (fig. A5.1) :

$$E^C(X) = \{x \in X \mid d(x,y) \geq c, \forall y \in E \setminus X\}$$

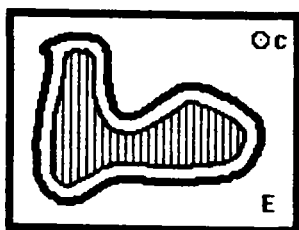


Figure A5.1: L'érosion de X par C

La dilatation de X par C est quasiment l'inverse (fig. A5.2):

$$D^C(X) = \{x \in E \mid \exists y \in X: d(x,y) \leq c\}$$

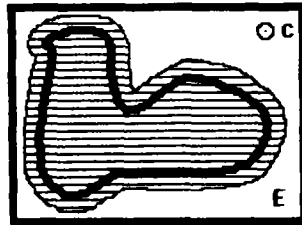


Figure A5.2: La dilatation de X par C

On voit que la dilatation $D^C(X)$ est exactement l'érosion $E^C(E \setminus X)$ du complément de X relatif à E .

A l'aide de ces deux transformations, on peut simplifier une forme géométrique donnée. Les formes transformées peuvent maintenant être classées d'une meilleure manière parce qu'on élimine de petites courbures des formes.

Une transformation encore plus rigoureuse est la squelettisation (cf. Coster/Chermant, 1985; Pratt, 1978) qui décrit une forme par des "lignes caractéristiques" :

Soit X un ensemble et ∂X sa frontière. s appartient au squelette $sq(X)$ de X , si (fig. A5.3) :

$$\exists y_1, y_2 \in \partial X, y_1 \neq y_2 : d(s, y_1) = d(s, y_2)$$

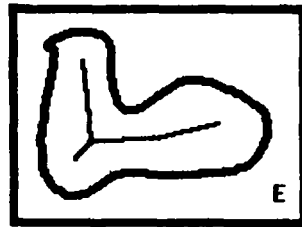


Figure A5.3: Le squelette de X

Différemment à l'érosion et la dilatation, la squelettisation conserve la connexité et l'homotopie d'un objet. Mais un squelette digitalisé n'est pas déterminé en tout cas, différents algorithmes donnent des résultats différents. Et des petits changements peuvent provoquer des squelettes très différents (Fig. A5.4).

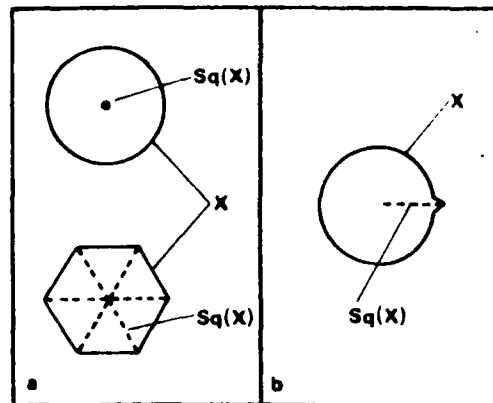


Figure A5.4: Les squelettes de deux objets ressemblants

Cette perte d'information qui est l'une des deux raisons pour lesquelles cette méthode n'est pas applicable pour notre cas des échos radar : on risque de perdre trop de détails sur la forme pour faire une bonne prévision. La deuxième raison est l'obligation de travailler au niveau des données brutes, ce qui entraîne en tous cas une augmentation considérable en temps de calcul.

5.2. Un exemple de description microscopique d'une forme

Il y a plusieurs manières de décrire une forme en suivant sa bordure (étant un différent problème, la détermination de la bordure ne sera pas discutée ici. Des discussions assez complètes se trouvent dans des ouvrages principaux sur le traitement d'images comme Pratt (1978), Rosenfeld/Kak (1982), Cohen/Feigenbaum (1982) ou d'autres).

Une manière originale de décrire une forme minutieusement a été proposée par Freeman (1970). En codant les huit points autour d'un point X de 0 à 7, (fig. A5.5) on peut ainsi décrire la circonscription d'une forme par une description du cheminement de la bordure. La forme de la fig. A5.6 est codée par 00017 12133 44356 5567. Ce codage comprime alors l'information de la forme en un minimum et des simples opérations arithmétiques permettent de faire des rotations de 45° , 90° , ..., 315° .

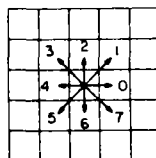
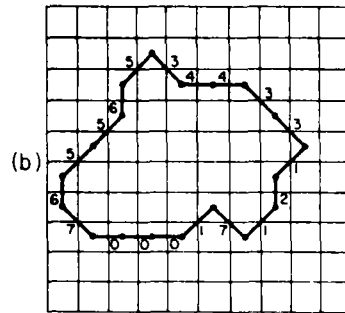


Figure A5.5: Le code de chaînage de Freeman

Par contre, une comparaison entre deux formes qui sont semblables ne peut pas être faite facilement, parce que l'information sur la bordure est une information microscopique qui dépend essentiellement de la longueur du périmètre des objets. Cette méthode ne nous paraissait pas adaptée aux besoins pour le couplage des échos radar.



Chain encoding of boundary lines

CHAIN CODE:
00017 12133 44356 5567

Figure A5.6: Application de ce codage

ANNEXE 6

CAPPI ET BANDE BRILLANTE

Cette annexe va expliquer les termes CAPPI et bande brillante.

A.6.1. Le CAPPI

Quand on mesure la pluie par un radar, il faut qu'on utilise un certain angle d'élévation du faisceau de radar, entre 0° et 3° habituellement. Les mesures faites d'une telle façon s'appellent "Plan Position Indicator" (PPI) en anglais. Puisqu'on rencontre des problèmes avec une élévation trop basse comme sont les échos de sol, provoqués par des bâtiments ou des collines autour du radar, on est tenté d'utiliser une élévation de l'angle d'antenne un peu élevé. D'autre part, une élévation importante pose des problèmes aux mesures distantes, comme décrits dans le chapitre 4.2.2. Il faut, pour mesurer la pluie au-delà de 70-100 km, utiliser une élévation très basse.

Une manière d'éviter ces problèmes, c'est d'utiliser une combinaison de plusieurs élévations de l'antenne pour les mesures préférablement sur la même altitude. Une telle mesure sur une altitude constante qui s'appelle "Constant Altitude Plan Position Indicator" (CAPPI) est schématiquement présentée dans la figure A.6.1.

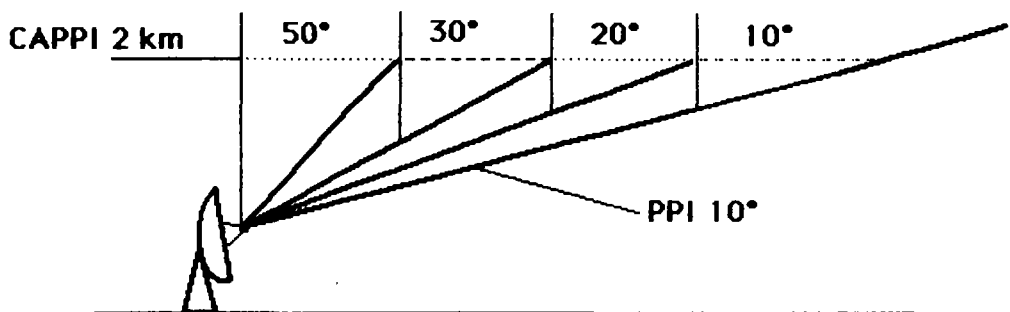


Figure A6.1: Schéma du CAPPI

L'inconvénient du CAPPI pour l'hydrologie est surtout qu'on n'utilise toujours pas les mesures les plus représentatives pour l'eau qui arrive au sol, c'est-à-dire les mesures du faisceau le plus bas possible.

Par contre, avec cet outil on peut facilement éviter la bande brillante (A6.2) et réduire une partie des échos fixes (cf. chap. 4.2.1).

Pour produire un CAPPI, un radar doit pouvoir changer son angle d'élévation. Ceci n'est pas le cas avec le radar de Trappes.

A.6.2. La bande brillante

Quand le faisceau du radar passe par une région de neige fondante, on observe une réflectivité fortement augmentée, d'une "brillance" extraordinaire (fig. A.6.2.). Puisque ce phénomène est placé à une certaine hauteur fixe sur toute l'image à un instant donné, on l'aperçoit comme une bande circulaire autour du radar. La largeur de cette bande correspond à l'épaisseur réelle de cette région de neige fondante (en fonction de la distance de la bande au radar, cf. fig. 4.5.).

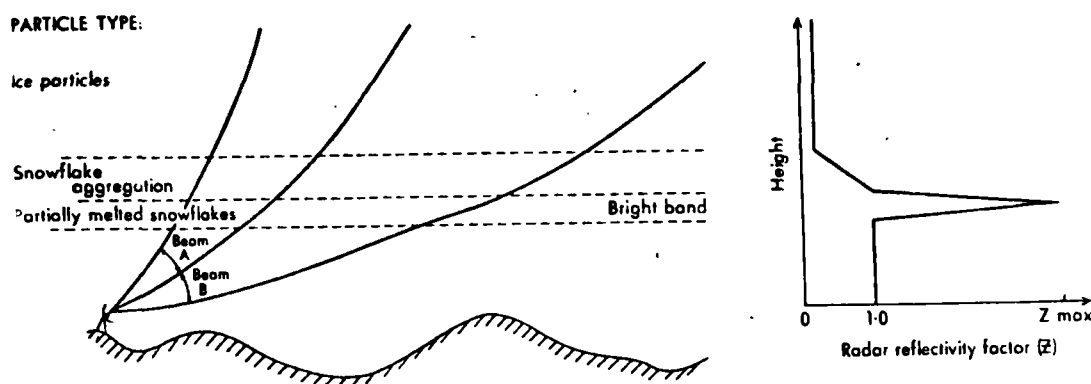


Figure A6.2: Le principe de la bande brillante

Pour corriger cet effet dans les mesures, les chercheurs du Meteorological Office en Angleterre ont entrepris plusieurs recherches (Clarke/Collier, 1977 ; Harrold/Kitchingman, 1975; ...) qui ont finalement donné une procédure automatique pour la détection et la correction des mesures (Smith, 1986).

Cette procédure se base sur deux mesures en différentes élévations de l'antenne qui sont comparées. Si il y a une bande brillante présente, on observe des régions de réflectivité importante différentes: la forte réflectivité des mesures prises avec un angle d'élévation bas se trouve à une distance supérieure à celle des mesures avec un angle plus haut (fig. A6.3.). Ceci est dû à la hauteur constante de la bande brillante sur une large surface et pendant longtemps. Des fortes réflectivités dues à la pluie par contre, doivent se trouver dans le même endroit sur deux images mesurées.

Avec la connaissance de l'épaisseur de la bande, de la réflectivité élargie et de la réflectivité réelle dans certaines zones (mesurées par l'une des deux images), on arrive à considérablement diminuer cet effet.

Un tel outil n'a pas été implanté dans le modèle scout.

